

GILA ABÍLIO JOÃO

**SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DO AUMENTO DO CO₂, TEMPERATURA DO
AR E PRECIPITAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DA *Brachiaria brizantha*
UTILIZANDO O MODELO INLAND**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

J62s
2016 João, Gila Abílio, 1984-
Simulação dos impactos do aumento do CO₂, temperatura do ar e precipitação na produtividade da *Brachiaria brizantha* utilizando o modelo InLand / Gila Abílio João. – Viçosa, MG, 2016.

xix, 75f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.59-63.

1. Plantas forrageiras - Produção. 2. *Brachiaria brizantha*.
3. Dióxido de carbono. 4. Temperatura atmosférica.
5. Precipitação (Meteorologia). I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.27

GILA ABÍLIO JOÃO

SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DO AUMENTO DO CO₂, TEMPERATURA DO AR E PRECIPITAÇÃO NA PRODUTIVIDADE DA *Brachiaria brizantha* UTILIZANDO O MODELO INLAND

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

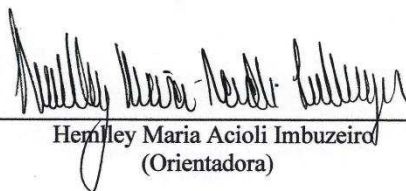
APROVADA: 16 de fevereiro de 2016.



Anderson Adriano Martins Melo



Marcos Heil Costa



Herlley Maria Acioli Imbuzeiro
(Orientadora)

À Deus, minha fortaleza, sempre...

Em memória do meu pai, ABÍLIO VICTORINO JOÃO.

Dedico.

“Quando você visualiza, você materializa ”

(Denis Waitley)

*“Embora eu caminhe por vales tenebrosos, nenhum mal temerei, pois junto a mim estás;
Em verdes pastagens me faz repousar; para fontes tranqüilas me conduz, e restaura minhas
forças. O Senhor é o meu pastor, Nada me faltará. ”*

(Salmo 23 (22))

AGRADECIMENTOS

À DEUS em primeiríssimo lugar pela vida, saúde, amor, inteligência e por guiar os meus passos rumo à realização dos meus sonhos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de me formar e concluir Mestrado em Meteorologia Agrícola.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos através do Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação – PEC-PG.

À minha família, em especial a minha mãe, Elisa. Mesmo estando longe, vocês nunca deixaram de me incentivar e de acreditar em mim. Obrigado a todos vocês por tudo!

Ao meu esposo Herculano, pelo amor, compreensão, incentivo, sempre. Ao meu filhinho amado Yohan pelo amor, ternura, carinho e paciência em todos os momentos em que fiquei ausente.

À minha estimada orientadora, Professora Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro, pela amizade, carinho, compreensão, paciência, atenção, pelos ensinamentos, pelo apoio tanto profissional quanto pessoal, e principalmente por todas as sugestões dadas durante a realização deste trabalho.

À Universidade Zambeze (UniZambeze), pelo apoio e oportunidade disponibilizada para poder frequentar este curso, e em especial ao Professor Bhangy Cassy e Daniel Chongo.

À Graça, com luz que ela trás em sua alma exuberante, ela mostra o caminho a seguir, mesmo estando no outro continente sem se importar de quem se trata, indica paulatinamente o que tem que ser feito para alcançar determinado objetivo.

À Edna e Vânia as mães postiças que ganhei no Brasil, que incansavelmente ensinaram-me a ser mãe e me ajudaram a cuidar com muito amor e carinho do meu Yohan. Sem palavras a expressar...

Aos meus co-orientadores, Professor Paulo Hamakawa e Milton Pereira, pelos ensinamentos e sugestões na realização do trabalho.

Aos Professores Gilberto Sedyama, Aristides Ribeiro e Flávio, pelo carinho, pela amizade, pela atenção, pelos ensinamentos e apoio pessoal sempre que precisei.

Ao meu amigo e padrinho, Professor José Leopoldo Nhampossa, pela amizade, pelo incentivo, pela atenção, pelo carinho e disponibilidade de sempre poder ajudar na concretização dos meus sonhos.

Aos meus amigos e colegas do Grupo de Pesquisa Micromet pela disponibilidade em ajudar sempre de maneira incondicional em especial Victor, Cindy e Willian.

Aos meus colegas do DEA em especial a Talacuece, Lívia, Vagna, Álvaro, Christian, Telmo, Gabriela, Emly, Mariana, Ana Paula, Francisca, Marcela, Gabrielle, Anderson, Andressa, Gabriel, Pauline, pelo apoio e amizade.

A minha grande amiga Ingrid, pela amizade, pelo carinho e apoio mesmo estando longe.

À Nancy, Cláudio, Carla, Maria, Cássia, Érica, Betinho, Dirci, Kauã, Luana, Helton, Ângela e Renata pela amizade, carinho e atenção.

À Fátima pelo carinho incondicional e amizade.

A todos não mencionados aqui que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, endereço meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA

GILA ABÍLIO JOÃO, filha de Abílio Victorino João e Elisa Benta Abílio, nasceu em 04 de Setembro de 1984, na cidade de Mopéia, Província da Zambézia, Moçambique.

Em dezembro de 2003, concluiu o ensino médio pela Escola Secundária e Pré-Universitária 25 de Setembro, Quelimane – Zambézia, Moçambique. Em fevereiro de 2005, iniciou o curso de graduação em Meteorologia na Universidade Eduardo Mondlane (UEM) em Maputo (Moçambique) e em Julho de 2009 graduou-se como Meteorologista. Em março de 2010, ingressou como Assistente Estagiário no quadro efetivo da Universidade Zambeze em Moçambique onde trabalhou até fevereiro de 2014. Em março de 2014 iniciou o curso de Pós-graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola, na linha de pesquisa em modelagem da Interação Biosfera-atmosfera no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xviii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
2.1 Descrição da área de estudo.....	4
2.2 Dados	5
2.3 Descrição do modelo	5
2.4 Experimentos de Simulações	8
2.4.1 Simulação de validação do InLand	9
2.4.2 Cenário 1 – Simulações com aumento da concentração de CO ₂ atmosférico	11
2.4.3 Cenário 2 – Simulações com variação da temperatura do ar	12
2.4.4 Cenário 3 – Simulações com variações da concentração de CO ₂ atmosférico e da temperatura do ar.....	12
2.4.5 Cenário 4 – Simulações com variações da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar e da precipitação.....	12
2.4.6 Cenário 5 – Simulações com variação da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar	13
2.4.7 Cenário 6 – Simulações com variação da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar, da precipitação e da umidade relativa do ar.....	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
3.1 Validação doInLand.....	15

3.1.1 Discussão da validação.....	16
3.2 Cenários de variações da concentração de CO ₂ atmosférico e da temperatura do ar	25
3.3 Cenários de variações da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar e da precipitação	28
3.4 Cenários de variações da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar.....	39
3.5 Cenários de variações da concentração de CO ₂ atmosférico, da temperatura do ar, da precipitação e da umidade relativa do ar.....	42
3.6 Discussão conjunta dos cenários 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.....	53
4. CONCLUSÕES	56
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
6. APÊNDICE	64

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-** Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), troca líquida do ecossistema (NEE) e produtividade primaria bruta(GPP), com a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes de dispersão. 18
- Figura 2-** Gráficos cumulativos dos dados observado e simulado para o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), troca líquida do ecossistema (NEE) e produtividade primaria bruta (GPP) em Rondônia para os anos de 1999 a 2001. 19
- Figura 3-** Saldo de radiação (Rn) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia.....20
- Figura 4-** Fluxo de calor sensível (H) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia. Períodos em branco representam aqueles sem dados observados.21
- Figura 5-** Fluxo de calor latente (LE) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia. Períodos em branco representam aqueles sem dados observados.22
- Figura 6-** Troca líquida do ecossistema (NEE) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia.....23
- Figura 7-** Produtividade primaria bruta (GPP) observada e simulada, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 em Rondônia.....24
- Figura 8 -** Gráfico com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade

primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.26

Figura 9- Gráfico com os efeitos de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE, em inglês), produtividade primária líquida (NPP, em inglês) e produtividade primária bruta (GPP, em inglês) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.....27

Figura 10- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.31

Figura 11- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.32

Figura 12- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.33

Figura 13- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.34

Figura 14- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e

produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.35

Figura 15- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001. 36

Figura 16- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001. 37

Figura 17- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001. 38

Figura 18- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, aumento da temperatura do ar e variações da umidade relativa do ar com a temperatura para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001. 40

Figura 19- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, aumento da temperatura do ar e variações da umidade relativa do ar com a temperatura para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001. 41

Figura 20- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE),

produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.....45

Figura 21- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.46

Figura 22- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.47

Figura 23- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação atmosférica e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.48

Figura 24- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.49

Figura 25- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.50

Figura 26- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE),

produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.....51

Figura 27- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos funcionais de plantas (PFTs)	9
Tabela 2- Concentração de CO ₂ atmosférico, temperatura do ar, precipitação atmosférica e umidade relativa do ar utilizada nas simulações e suas combinações	11
Tabela 3- Raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), viés médio (MBE), índice de concordância de Willmott (d), teste t pareado entre os dados observados e simulados.	15

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g	Assimilação de CO ₂ bruta
A_n	Assimilação de CO ₂ líquida
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
b	Intercepto da relação linear
c_i	Concentração interna de CO ₂ na câmara subestomática
CO ₂	Dióxido de carbono
c_s	Concentração de CO ₂ na camada limite foliar
d	Índice de concordância de Willmott
e	Pressão de vapor de água
e_s	Pressão de vapor de água no estado de saturação
GPP	Produtividade Primária Bruta
g_s	Condutância estomática
H	Fluxo de calor sensível
J_c	Taxa de assimilação de CO ₂ limitada pela Rubisco
J_e	Taxa de assimilação de CO ₂ limitada pela luz
K_c	Coefficientes de Michaelis-Menten para CO ₂
K_o	Coefficientes de Michaelis-Menten para O ₂
LAI	Índice de área foliar
LE	Fluxo de calor latente
L_{in}	Radiação de onda longa incidente
m	Coefficiente relacionado à condutância estomática

MAE	Erro absoluto médio
MBE	Viés médio
NEE	Troca líquida de CO ₂ do ecossistema
NPP	Produção primária líquida do ecossistema
P	Precipitação
P _c	Precipitação de controle
q _a	Umidade específica do ar
R _A	Respiração autotrófica do ecossistema
R _d	Respiração de manutenção
R _H	Respiração heterotrófica
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
R _n	Saldo de radiação
R ²	Coefficiente de determinação
S _{in}	Radiação solar incidente
T	Temperatura da folha
t	Teste pareado
T _a	Temperatura do ar
T _c	Temperatura de controle
u _a	Velocidade horizontal do vento
U _r	Umidade relativa do ar
V _{máx}	Capacidade máxima da enzima Rubisco a 15°C
α ₃	Eficiência quântica da planta C3
Γ*	Ponto de compensação para a assimilação de CO ₂ bruta

ζ	Custo de respiração da atividade da Rubisco
$\omega(T)$	Função de estresse devido à temperatura
$\omega(S)$	Função de estresse devido à umidade do solo

LISTA DE ABREVIATURAS

FNS	Fazenda Nossa Senhora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBIS	Modelo Integrado da Biosfera
InLand	Modelo Integrado de Processos Superficiais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LBA	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
PFTs	Tipos Funcionais de Plantas

RESUMO

JOÃO, Gila Abílio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Simulação dos impactos do aumento do CO₂, temperatura do ar e precipitação na produtividade da Brachiaria brizantha utilizando o modelo InLand.** Orientadora: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientadores: Milton Edgar Pereira Flores e Paulo José Hamakawa.

As pastagens desempenham papel fundamental na pecuária brasileira, pois representam praticamente a base da produção de carne bovina. Devido a sua importância neste setor há necessidade de se realizarem estudos que prevejam a resposta das pastagens às alterações climáticas previstas para meados do século XXI. Desta forma objetivou-se avaliar os cenários de aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e temperatura do ar na produtividade da *Brachiaria brizantha* considerando mudanças na magnitude da precipitação, utilizando o Modelo Integrado de Processos Superficiais (InLand) no modo single point. Os dados utilizados nas simulações foram obtidos na Fazenda Nossa Senhora (FNS) em Rondônia para o período de 1999 a 2001. A validação do modelo foi avaliada de acordo com a raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), viés médio (MBE), índice de concordância de Willmott (d), teste t para dados pareado, gráficos de dispersão, cumulativo e de escala diária. Os resultados do modelo tiveram alto grau de ajuste aos dados observados, representando satisfatoriamente a variabilidade diurna do saldo de radiação (R_n), fluxos de calor sensível (H) e latente (LE), produtividade primária bruta (GPP) e troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE). Nos cenários simulados, o aumento da concentração de CO₂ incrementou a produtividade da *Brachiaria brizantha*, contrariamente ao verificado com o aumento da temperatura do ar, que resultou na redução nos valores de produtividade. Quando combinados os cenários de aumento da concentração de CO₂, temperatura do ar e variação da precipitação em $\pm 50\%$, não houve alteração da tendência do decréscimo dos valores de produtividade provocada pelo aumento da temperatura do ar, sendo a diminuição mais crítica nos cenários com redução da precipitação e mitigados pelo aumento da precipitação. Os resultados das simulações indicam que o efeito das forçantes relacionadas à mudança climática (aumento da concentração de CO₂ atmosférico e temperatura do ar) e ao desmatamento (mudanças na precipitação e umidade relativa do ar) é de redução na produtividade da *Brachiaria brizantha* em Rondônia.

ABSTRACT

JOÃO, Gila Abílio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Simulation of the impacts of rising CO₂, air temperature and precipitation in the productivity of Brachiaria brizantha using the InLand model.** Adviser: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-advisers: Milton Edgar Pereira Flores and Paulo José Hamakawa.

Pastures play a key role in the Brazilian cattle industry, since they represent practically the basis for beef production. Due to its importance in this sector there is a need for studies that predicts the responses of grasslands to climate changes foreseen for the middle of the XXI century. Thus, this study aimed to evaluate scenarios of increased carbon dioxide (CO₂) concentration and air temperature in the productivity of *Brachiaria brizantha* considering changes in the magnitude of precipitation, using the Integrated Model of Land Surface Processes (Inland) on single point mode. The data used in the simulations were obtained at the Nossa Senhora Farm (FNS) in Rondônia for the period 1999 to 2001. The model validation was evaluated according to the mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) mean bias (MBE), Willmott's index of agreement (d), t-test for paired data, scatter plots, cumulative and daily scale. The results of the model had a high degree of fit to the observed data, representing satisfactorily the diurnal variability of net radiation (R_n), fluxes of sensible (H) and latent heat (LE), gross primary productivity (GPP) and net CO₂ exchange in the ecosystem (NEE). In the simulated scenarios, the elevated CO₂ concentration increased *Brachiaria brizantha* productivity, as opposed to the observed with increasing air temperature, which resulted in lowered values of productivity. When combined the scenarios of increased CO₂ concentration, air temperature and variation of precipitation in $\pm 50\%$, there was no change in the trend of productivity decrease caused by the risen air temperature, being this decrease most critical in scenarios of reduced rainfall and mitigated by the increased precipitation. According to simulations, the effect of forcing related to climate change (increasing in atmospheric CO₂ concentration and air temperature) and deforestation (changes in precipitation and relative humidity) is reduced *Brachiaria brizantha* productivity in Rondônia.

1. INTRODUÇÃO

A pecuária bovina brasileira tem a maior parte de seu rebanho criado a pasto, o que lhe confere vantagens, como a forma mais econômica e prática de produzir e oferecer alimentos para os animais, (FERRAZ e FELÍCIO, 2010). Apesar disso, as pastagens estão frequentemente associadas ao desmatamento e a áreas de solos degradados, oriundos do manejo inadequado que provoca o abandono das áreas cultivadas devido a sua baixa produtividade. Estima-se que no Brasil existam cerca de 172,3 milhões de hectares de pastagem (IBGE, 2006), onde cerca de 100 milhões são representados por pastagens cultivadas e as restantes por naturais (FONSECA e MARTUSCELLO, 2010). As áreas de pastagens cultivadas são as principais responsáveis pela expansão agrícola no Brasil, na sua maioria, com a introdução de gramíneas africanas do gênero *Brachiaria* (DA SILVA et al, 2004). A maior parte da cadeia agropecuária nacional de carne e leite utiliza cultivares dessa espécie forrageira como uma das principais fontes de alimentos para o rebanho, tornando-se dessa forma de fundamental importância para a economia brasileira (FONSECA e MARTUSCELLO, 2010; DA SILVA e FERRARI, 2012; BUSTAMANTE et al. 2012).

Rondônia é um estado brasileiro com 237, 576 km² de área, com 74% da área ainda coberta por floresta e cerca de 20% por pastagem (LOSSAU et al., 2015). Com uma economia dinâmica, o estado possui um rebanho bovino de 12.744.326 de cabeças de gado, sendo o 7º maior do país, contribuindo como um dos maiores exportadores de carne bovina do Brasil e com uma produção de cerca de 690 milhões de litros de leite (IBGE, 2014). O estado possui os municípios mais antigos da região Norte e mais desmatados do Brasil, com elevado desenvolvimento humano. A pecuária de corte tem evoluído mais rapidamente, junto com a expansão das áreas de pastagens, pois possui nível tecnológico mais elevado que a pecuária de leite, ocupando a maior parte da área desmatada da região.

Estudos apontaram que as áreas de pastagem aumentaram em Rondônia, entre os anos de 1992 a 2008, juntamente com o aumento da produtividade e da taxa de lotação, que em média chega a 2,61 UA/ha (VALE e ANDRADE, 2012). Apesar da desaceleração, o baixo crescimento médio das áreas de pastagem em Rondônia nos últimos anos ocorreu principalmente como consequência da expansão das áreas agrícolas. A expansão da soja ocorre, principalmente, sobre áreas de pastagens degradadas que apresentam baixos índices

produtivos. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), houve um aumento de cerca de 20% na área plantada de soja em Rondônia na safra 2014/15, sendo a maior expansão percentual de área de soja no país.

Existe uma expectativa de que o Brasil seja capaz de suprir grande parte da demanda mundial por alimentos para a população mundial nos próximos anos, 2030 a 2050. Nessa perspectiva, o setor da pecuária bovina brasileira já se depara com gargalos importantes, como: a baixa produtividade das pastagens; a perda de áreas para a agricultura; a baixa taxa de lotação; a falta de acesso do produtor a novas tecnologias; adoção de práticas de manejo apropriadas; o uso racional dos recursos (solo, água e fertilizantes); que podem inviabilizar a meta de suprir grande parte da demanda global por proteína animal.

Aliado a esses gargalos, tem-se os efeitos da mudança climática e do desmatamento na produtividade das pastagens. Desde o século passado, os níveis de dióxido de carbono (CO₂) atmosféricos aumentaram em 39% da concentração da época pré-industrial, atingindo um nível elevado de 400 ppm em maio de 2013, com um correspondente aumento na temperatura média global de cerca de 0,8°C (LEUNG et al., 2014). Essas mudanças podem causar variações no clima e na produtividade agrícola (TAIZ et al., 2004). Estudos de modelagem apontam que a mudança climática global pode causar impactos negativos na produtividade da pastagem na Amazônia Legal (OLIVEIRA et al., 2013) e em praticamente todo território brasileiro (PIRES, 2015). Alinhado ao efeito do desmatamento contínuo, Rondônia pode sofrer com perdas de produtividade de cerca de 20% em suas pastagens, entre 2011-2020 a 2041-2050 (PIRES, 2015).

Diante da importância da Brachiaria no Brasil é de grande relevância simular a resposta potencial da produção desta planta em diferentes condições térmicas, hídricas e de concentração de CO₂ atmosférico, uma vez que essas modificações podem afetar diretamente a fisiologia da Brachiaria em vários aspectos, principalmente na dinâmica de processos fundamentais, como a fotossíntese de onde se origina a produção primária.

O InLand é um modelo de interação solo-vegetação-atmosfera utilizado para avaliar e quantificar o efeito do clima no crescimento e desenvolvimento das plantas. Verifica-se que o mesmo tem sido utilizado na previsão de produtividade de sistemas como pastagens (PIRES, 2015), na verificação da influência do clima, incêndio e fósforo na dinâmica da vegetação (SILVA, 2015), na avaliação do efeito na mudança da cobertura do solo (BENEZOLI, 2014) e

na cobertura vegetal na evapotranspiração (DIAS, 2013) da vazão da bacia de um rio. Assim, o presente trabalho visa validar o Modelo Integrado de Processos Superficiais (InLand) na simulação da produtividade primária bruta (GPP, em inglês), troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE, em inglês), Índice de área foliar (LAI, em inglês), saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE), além de verificar a influência dos efeitos individuais e conjunto da variação da concentração de CO₂ atmosférico, temperatura do ar, precipitação e umidade relativa do ar na produtividade primária líquida (NPP, em inglês), GPP e NEE da pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A área experimental está localizada na Fazenda Nossa Senhora (FNS), no município de Ouro Preto D'Oeste, Rondônia, cujas coordenadas geográficas são: Latitude: 10°46'S; Longitude: 62°21'W e Altitude: 267 m acima do nível médio do mar. A região apresenta estações seca e chuvosa bem definida sendo a estação chuvosa compreendida entre os meses de novembro e abril, com precipitação média total de 200 mm.mês⁻¹. A estação seca, que se estende de maio a outubro, apresenta períodos mais críticos de seca nos meses de junho a agosto, com precipitação média total menor que 20 mm.mês⁻¹. Ao longo do ano a média anual de precipitação nesta região é de 1975 mm.ano⁻¹, com temperatura do ar média mensal de 25,6°C em outubro (mês mais quente) e 22,7°C em julho (mês mais frio). A umidade relativa é de 80% para a estação chuvosa e 70% para a estação seca. Os ventos locais são predominantemente de norte durante todo ano, mas com ventos de sul em junho/julho associados à friagem (AGUIAR, 2007; ZANCHI et al., 2009).

O sítio experimental é caracterizado por uma área desmatada com gramado perene, considerado homogêneo, com altura de dossel entre 0,2 a 0,5 m destinado à criação de bovinos (ANDREAE et al., 2002). A cobertura vegetal predominante desde a década de 80 é a gramínea *Brachiaria brizantha* que forma 99% pastagem plantada na FNS, além de pequenas palmeiras nativas dispersas (AGUIAR, 2007; ZANCHI et al., 2009). O manejo da pastagem utiliza o método de rodízio onde os animais são mudados do local de pasto a cada 3 a 4 meses, não desgastando a pastagem que utiliza uma média de 2 a 3 animais por hectare, isso permite que a vegetação seja mantida para o período seco. Devido ao rodízio a cobertura vegetal não ultrapassa mais que 0,5 m de altura, não conseguindo atingir seu máximo crescimento (ZANCHI et al., 2009).

O solo da área experimental é classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo A, sendo caracterizado por apresentar as seguintes frações: 80% de areia, 10% de silte e 10% de argila.

2.2 Dados

Neste trabalho foram utilizadas medidas biométricas de plantas, dados coletados em estações meteorológicas automáticas e de torre micrometeorológica (fluxos de CO₂ e energia obtidas através da técnicas de covariância de vórtices turbulentos).

A série de dados utilizados nas simulações do modelo para a Fazenda Nossa Senhora em Rondônia foram obtidos pelo Sistema de dados e Informações do Programa Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA, em inglês), para o período de 01/01/1999 à 30/12/2001, disponíveis em intervalo de 60 minutos. A série de dados compreende de dois conjuntos. 1) Dados de forçantes atmosféricas: a radiação solar incidente (S_{in}), radiação de onda longa incidente (L_{in}), temperatura do ar (T_a), velocidade horizontal do vento (u_a), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR). 2) Dados para validar o modelo: saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), troca líquida do ecossistema (NEE, em inglês), produtividade primária bruta (GPP, em inglês) e Índice de área foliar (LAI, em inglês). Para avaliar os cenários da variação da concentração de CO₂ atmosférico, temperatura do ar, precipitação e umidade relativa do ar na pastagem foram utilizadas a produtividade primária líquida (NPP, em inglês), o GPP e NEE.

2.3 Descrição do modelo

O Modelo Integrado de Processos Superficiais (InLand) baseado no modelo Integrated Biosphere Simulator (IBIS) (FOLEY et al., 1996), vem sendo incrementado de modo a representar os principais processos superficiais brasileiros (BENEZOLI, 2014). É um modelo de grade com resolução espacial de aproximadamente 55 km (0,5°) e resolução em escala temporal horária, diária, mensal e anual. As simulações no modelo podem ser realizadas em modo de Grid (escalas global e regional) e em modo Single point (escala pontual com dados coletados em torres micrometeorológicas). No presente trabalho foram realizadas simulações single point.

A estrutura básica do InLand é composta por quatro módulos principais organizados de acordo com a ocorrência dos processos em escala temporal; Módulo de Vegetação (fenologia, dinâmica da vegetação, índice de área foliar e biomassa para 12 tipos funcionais de plantas - PFTs), Módulo Biogeoquímico de solos (ciclo de carbono, nitrogênio e nutrientes terrestres,

produtividade primária líquida, respiração do solo e decomposição da matéria orgânica), Módulo de Superfície (física do dossel e do solo, fisiologia vegetal, competição da vegetação por água e luz, efeitos fisiológicos do dossel, como a fotossíntese, condutância estomática e respiração) e o Módulo de Fenologia (a fenologia da vegetação baseada no desenvolvimento medido por graus-dia incluindo o aparecimento e crescimento das folhas).

O Módulo de Superfície é representado por dois dosséis: o inferior, que considera as gramíneas e arbustos, e o superior, que representa as árvores (DIAS, 2013). Para as simulações da pastagem foi considerado o dossel inferior.

A troca de radiação solar no sistema solo-vegetação-atmosfera, segue a aproximação de two-stream, onde é feita uma combinação das características de refletância e transmitância de camadas subsequentes para obter a refletância em um determinado ponto no dossel. Desta forma, um ponto localizado entre o dossel superior e o inferior será considerado como sendo iluminado por dois fluxos, vindos da camada superior e da inferior. Os cálculos são feitos separadamente para a radiação solar direta e difusa, ambas enfocando as bandas de comprimento de ondas do visível (0,4 a 0,7 μm) e infravermelho próximo (0,7 a 4,0 μm) do espectro de radiação. Dentro dos dosséis a radiação infravermelha é tratada como se cada dossel fosse um plano semitransparente com a emissividade dependente da densidade das folhas. As mudanças na temperatura e da unidade específica são conduzidas pelo balanço da radiação na vegetação e no solo, e a difusão dos fluxos turbulentos de calor sensível e do vapor de água (FOLEY et al., 1996).

Para simular os processos de troca gasosa no dossel são utilizadas as formulações da fotossíntese (COLLATZ et al., 1991), da condutância estomática (LEUNING, 1995) e da respiração (AMTHOR, 1994). Os processos de fotossíntese e a respiração são diferentes para plantas C3 e C4 e a transpiração é governada pela condutância estomática e acoplada à fotossíntese (BALL et al., 1987).

O modelo simula a assimilação de CO_2 e a respiração na escala da folha utilizando as equações de Farquhar (FARQUHAR et al., 1980; FARQUHAR e SHARKEY, 1982): onde a assimilação de CO_2 bruta (A_g) é uma função da luz absorvida (APAR), da temperatura da folha (T), da concentração interna de CO_2 (c_i), e da capacidade máxima da enzima Rubisco ($V_{\text{máx}}$); a respiração de manutenção (R_d) é uma função apenas de $V_{\text{máx}}$. Logo, temos que a assimilação de CO_2 líquida (A_n) é representada por:

$$A_n = A_g - R_d \quad \text{Eq.1}$$

$$A_g = \min(J_e, J_c) \quad \text{Eq.2}$$

$$J_e = \alpha_3 \text{APAR} \frac{c_i - \Gamma^*}{c_i + 2\Gamma^*} \quad \text{Eq.3}$$

$$J_c = \frac{V_m(c_i - \Gamma^*)}{c_i + K_c \left(1 + \frac{[O_2]}{K_o}\right)} \quad \text{Eq.4}$$

$$c_i = c_s - \frac{1,6A_n}{g_s} \quad \text{Eq.5}$$

$$V_m = V_{\text{máx}} \omega(T) \omega(S) \quad \text{Eq.6}$$

$$R_d = \xi V_{\text{máx}} \quad \text{Eq.7}$$

em que J_e é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz, J_c é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco, Γ^* é o ponto de compensação para a assimilação de CO_2 bruta, K_c , K_o são os coeficientes de Michaelis-Menten para CO_2 e O_2 , em que $K_c = 1,5 \times 10^{-4}$ e $K_o = 0,25$ a (15°C) , $\omega(T)$ é a função de estresse devido à temperatura, $\omega(S)$ é a função de estresse devido à umidade do solo, α_3 é a eficiência quântica da planta C_3 e ξ é o custo de respiração da atividade da Rubisco.

A condutância estomática (g_s) na equação 8 é simulada como uma função A_n e da concentração de CO_2 na camada-limite foliar (c_s) e UR conforme LEUNING (1995):

$$g_s = m \frac{A_n \cdot \text{UR}}{c_s} + b \quad \text{Eq.8}$$

em que m é o coeficiente relacionado à condutância estomática e b é o intercepto da relação linear.

O NEE (Eq.9) é simulado pelo modelo como uma função da respiração heterotrófica (R_H) e produtividade primária líquida (NPP). O NPP (Eq.10) é uma função do GPP e da

respiração autotrófica (R_A) do ecossistema (soma da respiração de manutenção e custo de alocação de CO_2). R_H é a soma da taxa de decomposição dos reservatórios metabólicos, lignina e estrutural de CO_2 das folhas, galhos e raízes em decomposição.

$$NEE = R_H - NPP \quad \text{Eq. 9}$$

$$NPP = GPP - R_A \quad \text{Eq. 10}$$

2.4 Experimentos de Simulações

Para a simulação da pastagem foi selecionada a opção vegetação estática entre as três formas disponibilizadas pelo modelo (vegetações estática, dinâmica e crescente a partir de um solo nu), que assume uma vegetação constante ao longo das simulações. Como o InLand ainda não possui a opção de manejo da pastagem, foi fixada a altura máxima da planta em 0,5 m para melhor representar o manejo que ocorreu em campo.

O modelo permite escolher o tipo funcional de plantas (PFTs) que será utilizada ao longo da simulação, mesmo já tendo definido o tipo de vegetação. Deste modo, para pastagem no InLand foram selecionados 5 PFTs sendo: PFT_1, PFT_2, PFT_9, PFT_11, PFT_12, que podem ocorrer nas condições climáticas da região em estudo (Tabela 1).

As simulações foram agrupadas de acordo com diferentes objetivos: 1) Simulação de Validação e 2) Simulações dos cenários de variações da temperatura do ar, da concentração de CO_2 , da precipitação (na estação chuvosa) e da umidade relativa do ar. Para todas as simulações, foi realizado um Spin-Up de 9 anos com a repetição de dados dos três anos, considerando ao todo 12 anos de simulações, onde os últimos 3 anos de simulação (1999 à 2001) foram abordados nos resultados.

Tabela 1- Tipos funcionais de plantas (PFTs)

PFT	Descrição
1	Árvores tropicais, de folhas largas e permanentemente verdes
2	Árvores tropicais de folhas largas, decíduas secas
3	Árvores de clima temperado quentes, de folhas sempre verdes
4	Árvores coníferas de clima temperado, de folhas sempre verdes
5	Árvores decíduas de clima temperado frio, de folhas sempre verdes
6	Árvores coníferas boreal, de folhas permanentemente verdes
7	Árvores boreais, coníferas decíduas de clima frio
8	Árvores decíduas boreais de clima frio, de folhas largas
9	Arbustos permanentemente verdes
10	Arbustos decíduos
11	Gramíneas do tipo C4
12	Gramíneas do tipo C3

2.4.1 Simulação de validação do InLand

Foi realizada uma simulação para o período de 1999 à 2001 com valor médio de 370 ppm da concentração de CO₂. A simulação foi avaliada de acordo com a raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês), o erro absoluto médio (MAE, em inglês), o viés médio (MBE, em inglês), o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981), o Teste t pareado e os gráficos de dispersão, do comportamento cumulativo e da escala diária (IMBUZEIRO, 2005).

Os parâmetros estatísticos utilizados para validação do modelo foram calculados para o ano de 2001 por ser o ano que apresentou menores falhas nos dados observados para todas as variáveis analisadas nesse processo, nominalmente Rn, H, LE, NEE e GPP. Os gráficos de dispersão e do comportamento cumulativo foram elaborados para todo o período em análise (1999 à 2001). Foram construídos gráficos na escala diária a partir de uma série de dados de dez dias consecutivos sem falhas nos dados observados para alguns meses contidos entre 1999 a 2001.

Na validação os resultados da saída do modelo foram comparados com os dados observados, pelo cálculo entre as séries de valores de RMSE (Eq. 11), MAE (Eq. 12), MBE (Eq. 13), d (Eq.14) e o t (Eq. 15), representados pelas seguintes equações:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{Eq.11}$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{N} \quad \text{Eq.12}$$

$$\text{MBE} = (\bar{S} - \bar{O}) \quad \text{Eq.13}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{Eq.14}$$

$$t = \sqrt{\frac{(N-1) \cdot (\text{MBE})^2}{\text{MSE} - (\text{MBE})^2}} \quad \text{Eq.15}$$

em que i é o i -ésimo ponto, S_i e O_i são variáveis simulada e observada no i -ésimo ponto, respectivamente, \bar{S} e \bar{O} são as médias das variáveis simulado e observado no i -ésimo ponto, respectivamente e N é o número de observações.

O MAE foi escolhido como medida de validação do InLand por não ser uma medida ambígua e por expressar o erro nas mesmas dimensões das variáveis em questão (Rn, H, LE, NEE e GPP). O MAE também indica a magnitude do erro médio, pois representa o limite inferior de RMSE. O MBE foi utilizado para indicar a média do viés do modelo, ou seja, quanto que a média dos valores simulados está superestimando ($\text{MBE} > 0$) ou subestimando ($\text{MBE} < 0$) a média das observações (WILLMOTT et al., 2005).

O d indica o grau de exatidão dos valores simulados em relação aos valores observados, sendo de d igual ou próximo de 1 representa uma perfeita concordância entre os valores simulados e os valores observados e qualquer aproximação de zero quando os esses valores

estão completamente discordantes (WILLMOTT et al., 1981). O teste t pareado indica o nível de significância entre os valores observados e simulados das variáveis em análise, levando em conta os graus de liberdade para as observações (N).

As simulações descritas em 2.4.2 a 2.4.7 foram elaborados com base nas variações da concentração de CO₂ atmosférico, temperatura do ar, precipitação, umidade relativa do ar e suas interações (Tabela 2).

Tabela 2. Concentração de CO₂ atmosférico, temperatura do ar, precipitação atmosférica e umidade relativa do ar utilizada nas simulações e suas combinações

UR	Cenário	Variáveis	Níveis
Constante (= controle)	1	CO ₂ (ppm)	370, 400, 450, 500, 600 e 700
	2	T _a (°C)	T _a = T _c - 2; T _a = T _c + 2; T _a = T _c + 4 e T _a = T _c + 6
	3	CO ₂ (ppm)	370, 400, 450, 500, 600 e 700
		T _a (°C)	T _a = T _c - 2; T _a = T _c + 2; T _a = T _c + 4 e T _a = T _c + 6
	4	CO ₂ (ppm)	370, 400, 450, 500, 600 e 700
		T _a (°C)	T _a = T _c - 2; T _a = T _c + 2; T _a = T _c + 4 e T _a = T _c + 6
P (mm)		P = P _c + 50%P _c e P = P _c - 50%P _c	
Função de T_a	5	CO ₂ (ppm)	370, 400, 450, 500, 600 e 700
		T _a (°C)	T _a = T _c - 2; T _a = T _c + 2; T _a = T _c + 4 e T _a = T _c + 6
	6	CO ₂ (ppm)	370, 400, 450, 500, 600 e 700
		T _a (°C)	T _a = T _c - 2; T _a = T _c + 2; T _a = T _c + 4 e T _a = T _c + 6
		P (mm)	P = P _c + 50%P _c e P = P _c - 50%P _c

2.4.2 Cenário 1 – Simulações com aumento da concentração de CO₂ atmosférico

Foram realizadas seis (6) simulações referentes ao período de 1999 a 2001 cuja única diferença entre elas foi a concentração atmosférica de CO₂ que foi variada de 370 ppm até 700

ppm. A partir destas simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

2.4.3 Cenário 2 – Simulações com variação da temperatura do ar

Foram realizadas quatro (4) simulações, com a concentração de CO₂ atmosférica de controle (370 ppm). A temperatura do ar controle foi alterada em -2, +2, +4 e +6°C. Com estas simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

2.4.4 Cenário 3 – Simulações com variações da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar

Foram realizadas vinte e quatro (24) simulações combinando as simulações de aumento da concentração atmosférica de CO₂ (cenário 1) e variação da temperatura do ar (cenário 2). Através dos resultados destas simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

2.4.5 Cenário 4 – Simulações com variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar e da precipitação

Foram realizadas um total de quarenta e oito (48) simulações combinando as simulações de aumento da concentração atmosférica de CO₂ (cenário 1), variação da temperatura do ar (cenário 2) e variação da precipitação durante a estação chuvosa (NEPSTAD et al., 2002; FISHER et al., 2007; ROWLAND et al., 2015), que ocorre nos meses de novembro a abril em Rondônia. A precipitação controle no período chuvoso foi reduzida de -50% e foram realizadas 24 simulações para todas as concentrações de CO₂ atmosférico combinadas com o cenário de variação de temperatura do ar. As restantes 24 simulações foram realizadas considerando um aumento da precipitação controle em +50% no período chuvoso, nas mesmas condições de variação da concentração de CO₂ e da temperatura do ar para redução da precipitação. Assim, com o resultado das simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

2.4.6 Cenário 5 – Simulações com variação da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar

Foram realizadas vinte e quatro (24) simulações combinando as simulações de aumento da concentração atmosférica de CO₂ (cenário 1), variações da temperatura do ar (cenário 2) e da umidade relativa do ar (UR).

Na escala diária a UR varia rapidamente com a variação da temperatura do ar (CLAESSON e NYCANDER, 2013), devido ao fato da pressão de vapor no estado de saturação (e_s , Eq.16) aumentar exponencialmente com o incremento da temperatura do ar e a pressão de vapor (e , Eq. 17) se manter quase inalterada (HATFIELD e PRUEGER, 2015). Assim a UR foi calculada utilizando a equação 17. Os valores de e foram obtidos utilizando os valores de UR e da temperatura de controle. Esses valores de e foram fixados na equação 17 e considerando os resultados de e_s foram obtidos novos valores de UR para cada variação de temperatura do cenário 2. Os novos valores de UR foram utilizados nas simulações deste grupo. A partir dos resultados das simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

$$e_s = 6,1078 * 10^{\left(\frac{7,5 * T_a}{237,3 + T_a} \right)} \quad \text{Eq.16}$$

$$UR = \frac{e}{e_s} * 100 \quad \text{Eq.17}$$

em que T_a é a temperatura do ar em °C que sofreu alteração em -2, +2, +4 e +6 °C nas simulações; e é a pressão parcial de vapor de águas em hPa e e_s é a pressão parcial de vapor de água no estado de saturação em hPa.

2.4.7 Cenário 6 – Simulações com variação da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar, da precipitação e da umidade relativa do ar

Foram realizadas um total de quarenta e oito (48) simulações combinando as simulações de aumento da concentração de CO₂ atmosférica (cenário 1), variação da temperatura do ar (cenário 2) e variação da precipitação atmosférica e da umidade relativa do ar (cenário 5). Com estas simulações foram obtidas as variações nos valores médios de GPP, NPP e NEE para pastagem cultivada (*Brachiaria brizantha*).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor abordagem dos resultados, esta secção foi dividida em grupos de objetivos de acordo com a ordem metodológica descrita em 2.4.

3.1 Validação do InLand

A Tabela 3 apresenta a raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), viés médio (MBE), índice de concordância de Willmott (d), teste t para dados pareados entre os dados observados e simulados, para Rn, H, LE, NEE e GPP. Em termos de balanço de energia, o modelo simula satisfatoriamente o Rn, com valores baixos de RMSE, MAE, MBE e exatidão aceitável com d próximo de um (1). O Modelo superestima LE e GPP e subestima H e NEE.

Tabela3- Raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), viés médio (MBE), índice de concordância de Willmott (d), teste t pareado entre os dados observados e simulados.

	Rn (W m ⁻²)	H (W m ⁻²)	LE (W m ⁻²)	NEE (Kg C ha ⁻¹ hr ⁻¹)	GPP (Kg C ha ⁻¹ hr ⁻¹)
RMSE	15,65	34,92	70,84	8,37	4,92
MAE	9,36	20,78	43,17	5,73	2,51
MBE	2,28	-6,33	33,27	-0,73	1,22
Parâmetros estatísticos adimensionais					
d	0,99	0,92	0,89	0,75	0,93
t*	12,87	16,71	45,04	8,18	23,90

em que t* representa os valores de t calculados (Eq.15)

A Figura 1 apresenta os gráficos de dispersão para Rn (Fig. 1a), H (Fig. 1b), LE (Fig. 1c), NEE (Fig. 1d) e GPP (Fig. 1e). O gráfico indica um ajuste quase perfeito para o Rn, com coeficiente de determinação (R²) de 0,995. O modelo não obteve melhor ajuste para NEE, apresentando baixo R² de 0,573. Os valores de R² para H, LE e GPP foram 0,757, 0,803 e 0,753, respectivamente, indicando que uma considerável parte dos valores simulados foram

explicados pelos valores observados o que representa um bom ajuste do modelo para H, LE e GPP.

Os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de Rn, H, LE, NEE e GPP em função do tempo, são apresentados na Figura 2. Nesta figura, observa-se que o Rn (Fig. 2a) é bem representado pelo modelo, o qual superestima LE (Fig. 2c) e GPP (Fig. 2e) e subestima NEE (Fig. 2d) ao longo de todo período. O H (Fig. 2b) é simulado satisfatoriamente até aproximadamente agosto de 2000, após esse período passa a ser subestimado pelo modelo.

As Figuras 3 a 7 apresentam a variação temporal dos fluxos observado e simulado de Rn (Fig. 3), H (Fig. 4), LE (Fig. 5), NEE (Fig. 6) e GPP (Fig. 7), respectivamente, para períodos selecionados de dez dias. O modelo simula bem Rn e H para os dias selecionados ao longo do período de 1999 a 2001, conforme as Figuras 3 e 4, respectivamente. O modelo superestima o LE (Fig. 5) em quase todos os períodos selecionados ao longo do período de 1999 a 2001 (Figuras 5a, 5b, 5c, 5d, 5e), exceto na Figura 5f onde ele subestima as observações. O InLand consegue representar bem a variação diurna da NEE observado (Figura 6), exceto no período noturno onde os valores observados de NEE apresentam um comportamento dispersivo. No geral o modelo representa bem a variação diurna do GPP (Figura 7), porém em alguns períodos o modelo superestima o GPP (Figura 7b).

3.1.1 Discussão da validação

A validação estatística (Tabela 3) e gráfica (Figuras 1 a 7) do saldo de radiação (Rn) e fluxo de energia (H e LE) e o fluxo de CO₂(NEE e GPP) foram aceitáveis. O Rn e os fluxos de energia (H e LE) e CO₂ (GPP e NEE) tiveram exatidão elevada com valores de d iguais a 0,999, 0,923 e 0,892, 0,999 e 0,751, respectivamente, indicado que o modelo simulou com exatidão as variáveis. Observou-se que o InLand superestimou o Rn, LE e GPP, e subestimou o H e NEE pelo MBE (Tabela 3). Constatou-se um elevado ajuste de Rn nos gráficos de dispersão (Fig. 1a.) e cumulativo (Fig. 2a), não refletindo a superestimação pré-indicada pelo MBE. Essa contradição em parte foi devida à diferença dos dados utilizados na elaboração dos gráficos e por outra, pode ser devido ao fato do MBE não ser por si uma medida conclusiva de precisão (WILLMOTT et al., 2005).

De acordo com a Tabela 3 o modelo foi mais preciso para GPP, NEE e Rn, pois apresentaram os valores de RMSE e MAE menores e próximos entre si que as outras variáveis H e LE com menor precisão. Para $\alpha = 0,05$ temos $t_{\infty}^c = 1,960$. Como $|t_{\text{Observado}}| > 1,960$, rejeitamos H_0 . Assim, os valores observados e simulados de todas as variáveis analisadas na validação diferem entre si em nível de significância de 5% de acordo com os valores calculados do teste t para dados pareados (Tabela 3).

Os gráficos do comportamento diário das variáveis simuladas para os períodos de dez dias consecutivos selecionados e que abrangem as diferentes estações do ano, permitiram entender as possíveis causas das diferenças entre os dados observados e simulados pelo modelo. As maiores superestimativas de LE (Fig. 5) foram observadas nos meses de dezembro (Fig. 5d) e fevereiro (Fig. 5a) correspondendo ao período chuvoso, com elevada temperatura do ar e precipitação. Esta condição normalmente favorece a ocorrência de taxas elevadas de crescimento da biomassa devido à disponibilidade de água e temperatura requerida pela *Brachiaria*. A dinâmica do crescimento da biomassa no período de chuvas pode ser responsável pela maior partição da energia na forma de calor latente quando comparado com o calor sensível, o que pode explicar a superestimativa do LE. O contrário pode explicar a superestimativa de H (Fig. 4f) no período de Inverno onde ocorre a subestimativa do LE (Fig. 5f). A partição de energia e sua variação também condicionaram a produtividade primária líquida e bruta (Fig. 6 e 7). Maiores valores de GPP foram encontrados nas Figuras 7a, 7c, 7d e 7e, cujos períodos selecionados fazem parte da estação de ocorrência das chuvas para Rondônia.

Outra possível justificativa da diferença dos valores simulados face aos observados dos fluxos de energia pode ser pelas incertezas das observações dos fluxos turbulentos de energia pelo método de covariância de vórtice turbulentos, utilizados na obtenção dos dados observados dessas variáveis, que nem sempre se ajustam as medições de energia disponíveis, principalmente em condições de baixa turbulência. Nesta condição de baixa turbulência ocorrem também as incertezas nas medições dos fluxos de CO_2 (IMBUZEIRO, 2005).

O LAI estimado pelo InLand foi de 3,51 para todas as simulações. Este valor é menor quando comparado com os dados do MODIS (LAI=4,3) e as estimativas de STOCKLI et al., 2008 (LAI=4,8) e maior que o valor de LAI=2,8 encontrado por ZANCHI et al. em 2009 para a mesma região de estudo. Porém estudos indicam que o LAI do MODIS pode ser

superestimado em aproximadamente 2-15% (FENSHOLT et al., 2004). As diferenças nos valores de LAI, podem ser resultantes das condições próprias dos métodos utilizados na determinação do LAI e condições experimentais não sendo possível concluir a qualidade de estimação do LAI pelo InLand.

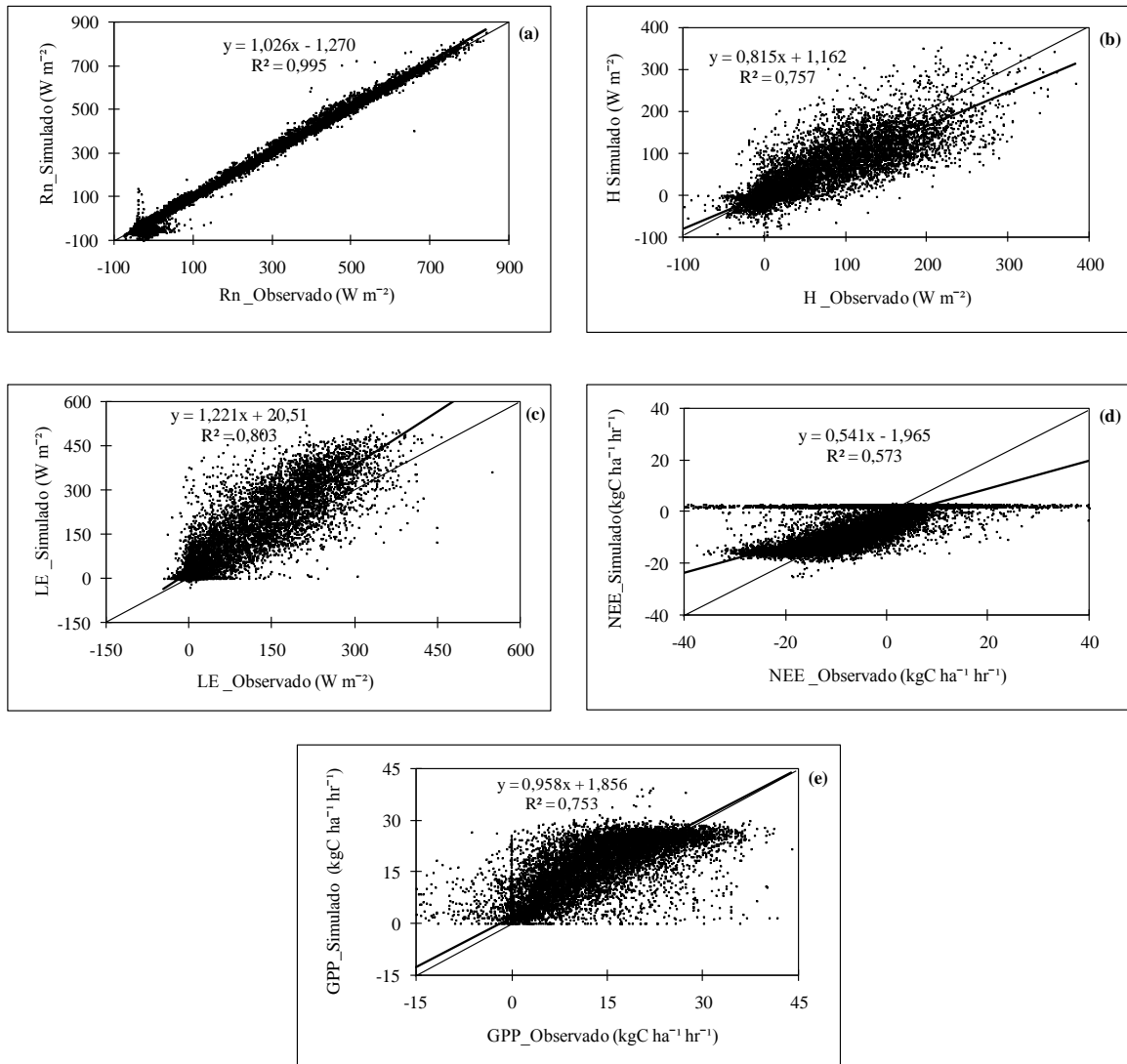


Figura 1- Gráficos de dispersão para o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), troca líquida do ecossistema (NEE) e produtividade primaria bruta(GPP), com a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes de dispersão.

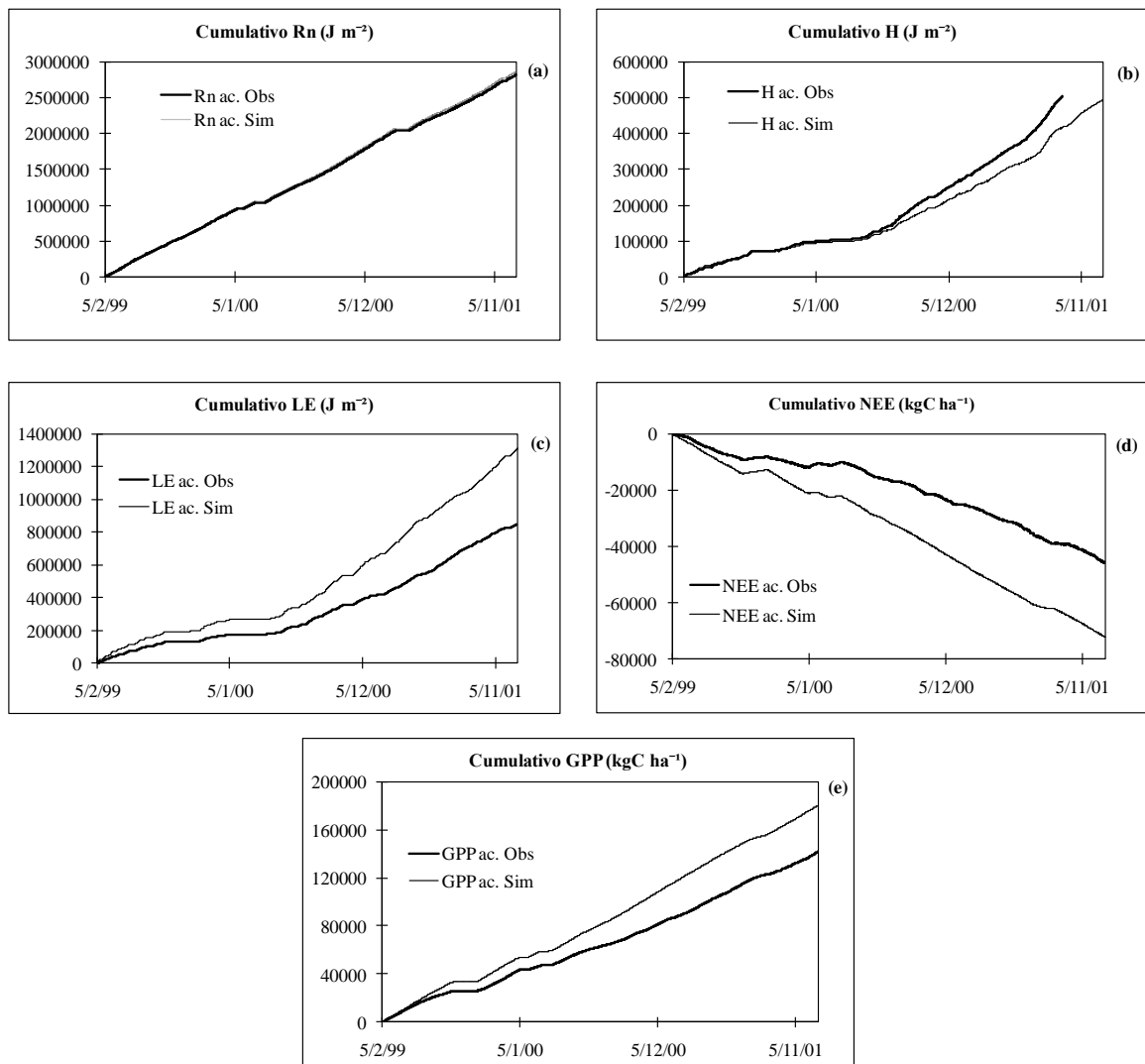


Figura 2- Gráficos cumulativos dos dados observado e simulado para o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), troca líquida do ecossistema (NEE) e produtividade primaria bruta (GPP) em Rondônia para os anos de 1999 a 2001.

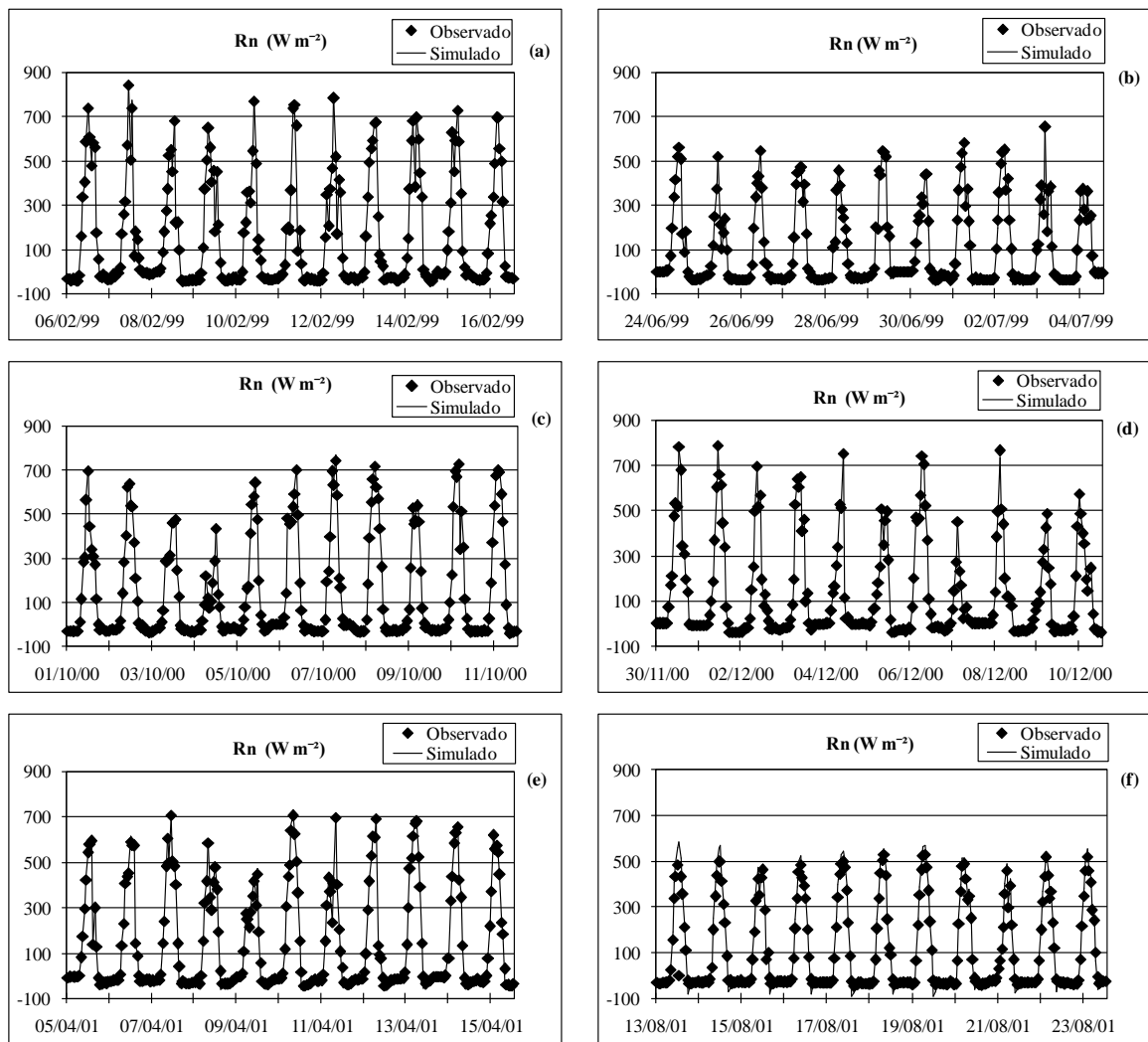


Figura 3- Saldo de radiação (Rn) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia.

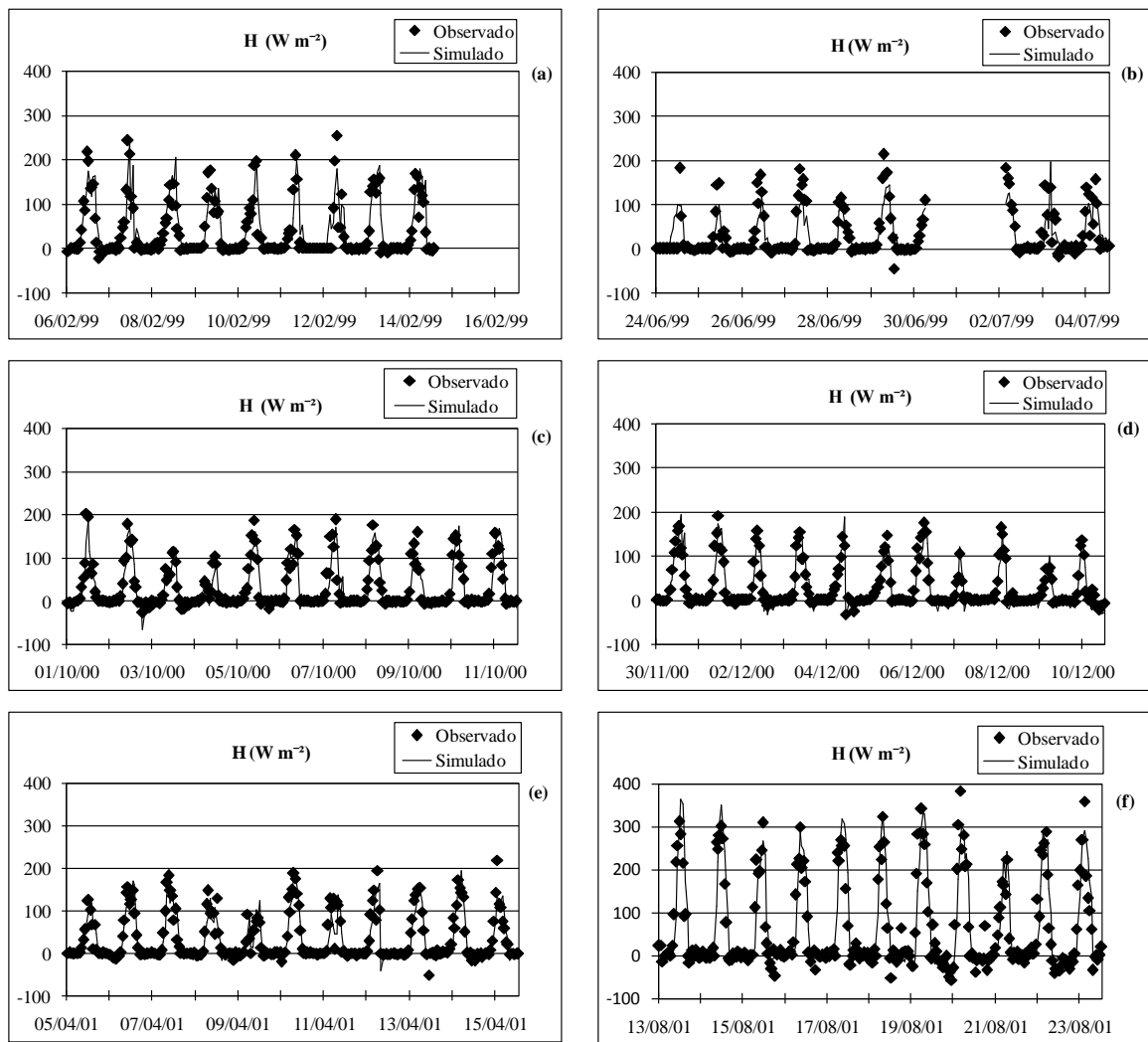


Figura 4- Fluxo de calor sensível (H) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia. Períodos em branco representam aqueles sem dados observados.

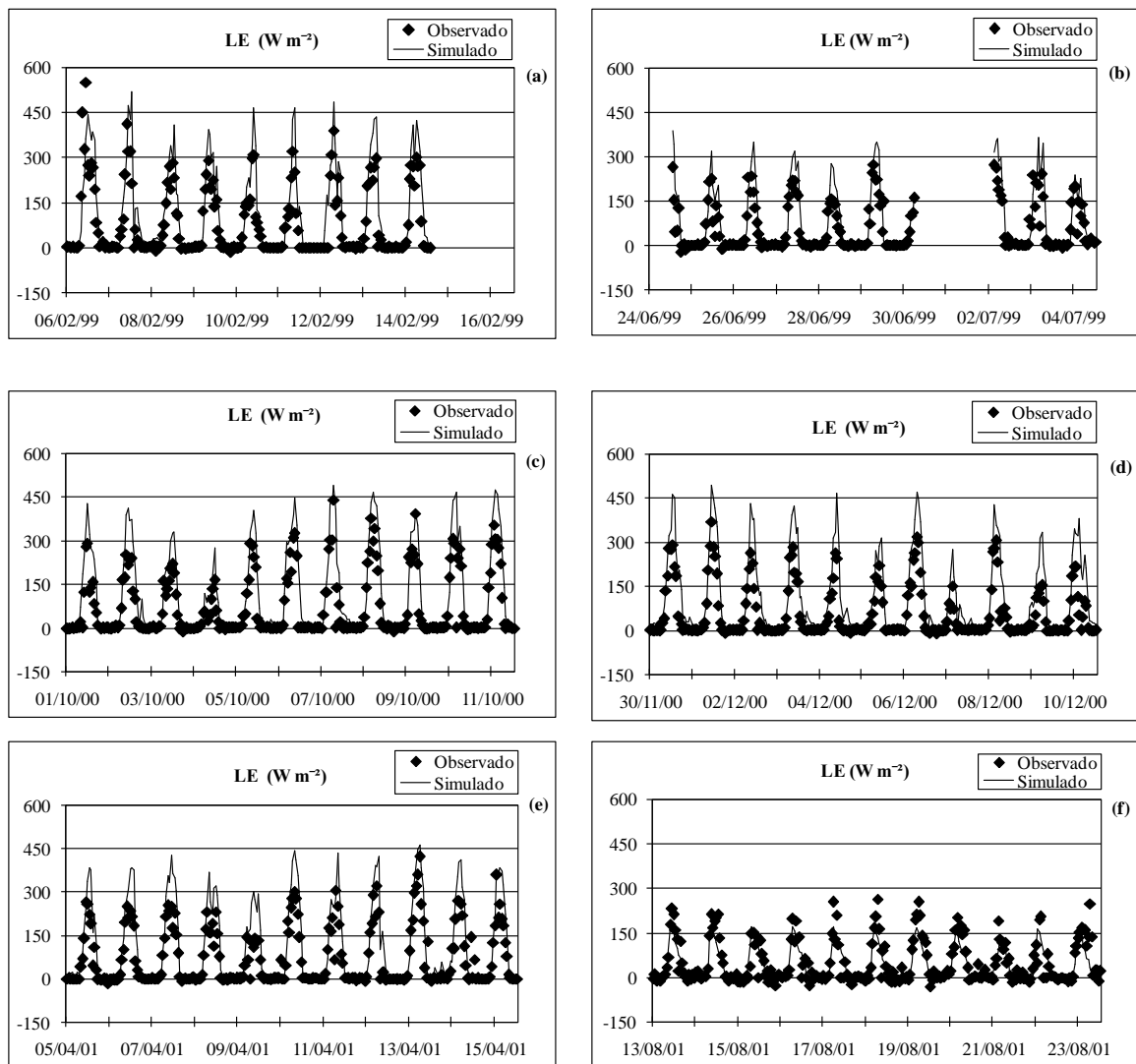


Figura 5-Fluxo de calor latente (LE) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia. Períodos em branco representam aqueles sem dados observados.

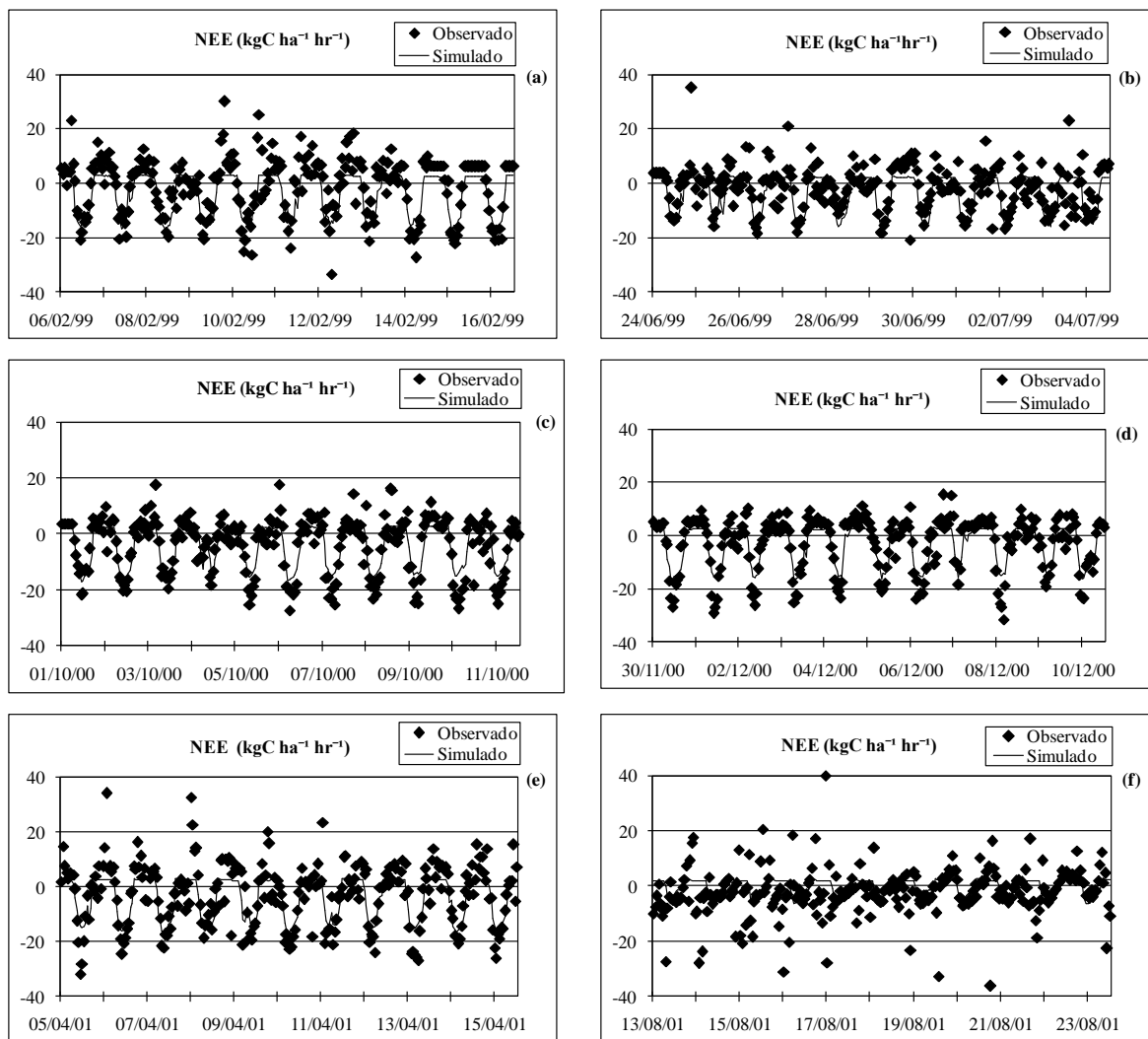


Figura 6- Troca líquida do ecossistema (NEE) observado e simulado, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para Rondônia.

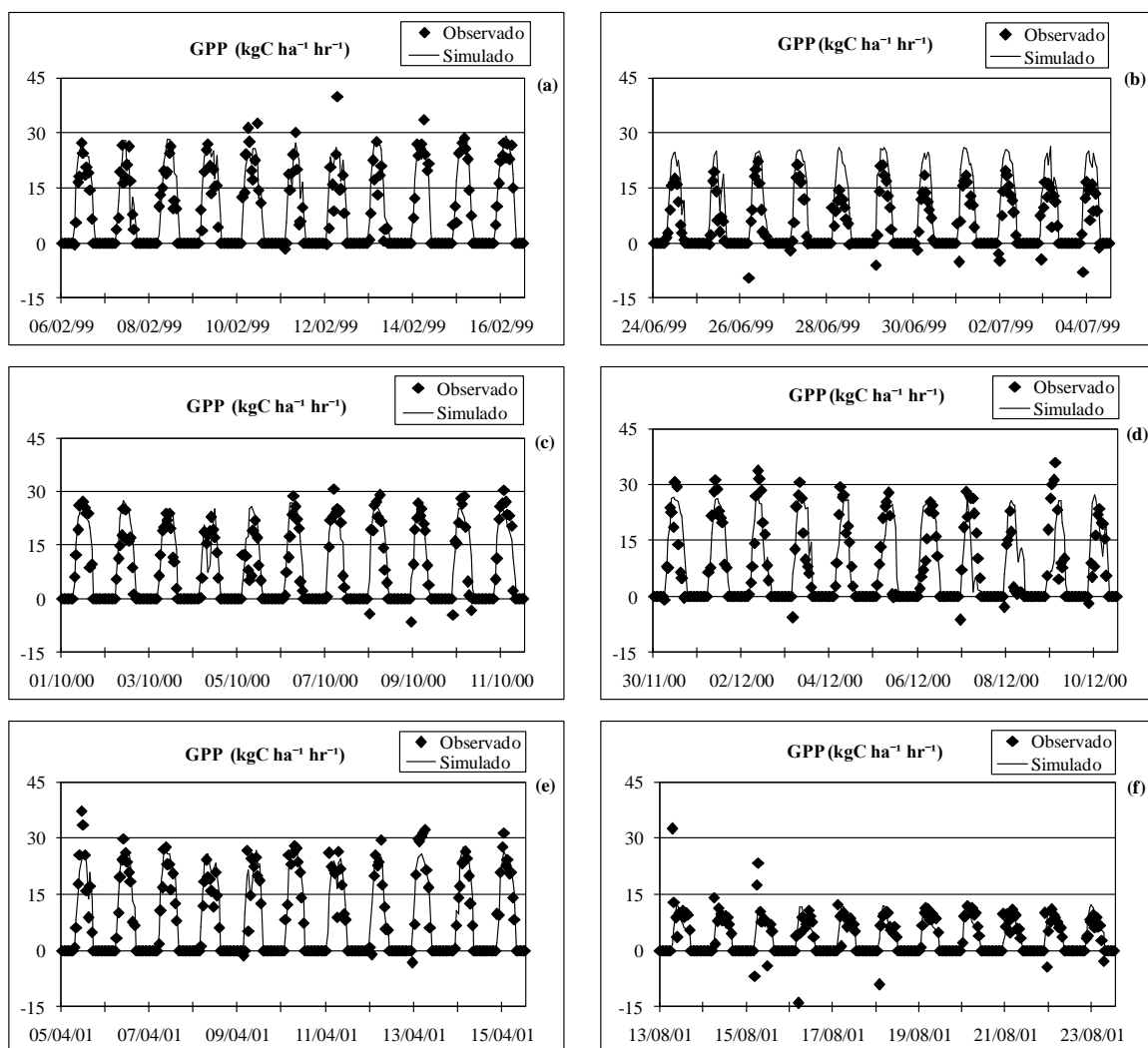


Figura 7- Produtividade primária bruta (GPP) observada e simulada, para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 em Rondônia.

3.2 Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar

A Figura 8 apresenta os gráficos dos cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variação da temperatura do ar para NEE (Fig. 8a), NPP (Fig. 8b) e GPP (Fig. 8c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos indicam que o aumento da concentração de CO₂ mantendo constante a temperatura do ar incrementaria o NEE, NPP e GPP. O aumento da temperatura do ar atual, para a mesma concentração de CO₂ provocaria uma redução nos valores de NEE, NPP e GPP, entretanto, o decréscimo da temperatura atual em 2°C aumentaria os valores dessas variáveis.

Na Figura 9 estão apresentados os efeitos do aumento da concentração de CO₂ e variação na temperatura do ar para NEE (Fig. 9a), NPP (Fig. 9b) e GPP (Fig. 9c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos mostram que a redução da temperatura em 2°C da temperatura controle seria benéfica para as variáveis em análise, pois incrementaria os seus valores, sendo o aumento médio anual de 0,10; 0,08; 0,07 kgC m⁻²ano⁻¹ para NEE, NPP e GPP, respectivamente, independentemente da concentração de CO₂ atual. Porém o aumento da temperatura do ar provocaria uma redução nos valores de NEE, NPP e GPP em 0,10; 0,09; 0,08 kg C m⁻²ano⁻¹ com o aumento da temperatura atual em 2°C, enquanto que um aumento da temperatura atual em 4°C induziria uma redução de 0,20; 0,17; 0,16 kg C m⁻²ano⁻¹ e de 0,31; 0,27; 0,25 kg C m⁻²ano⁻¹ com o aumento da temperatura atual em 6°C, respectivamente.

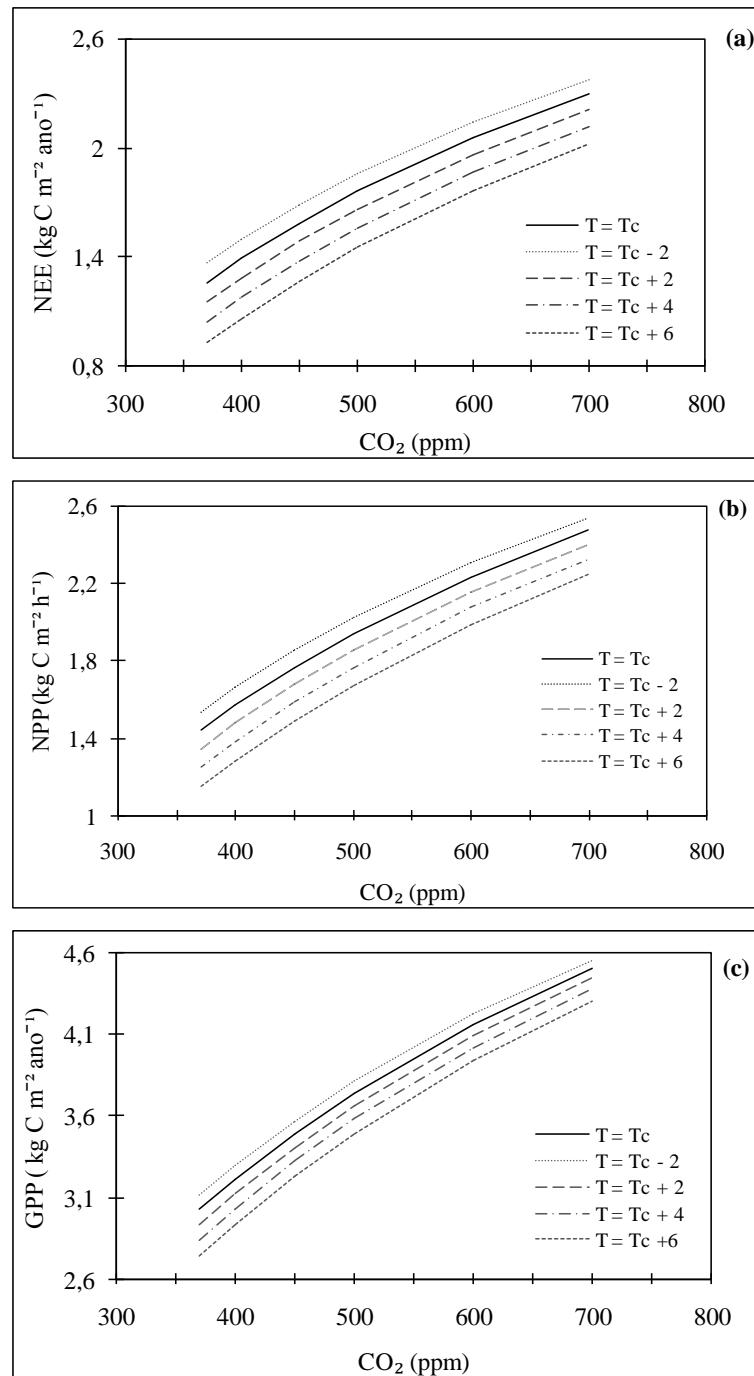


Figura 8 - Gráfico com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

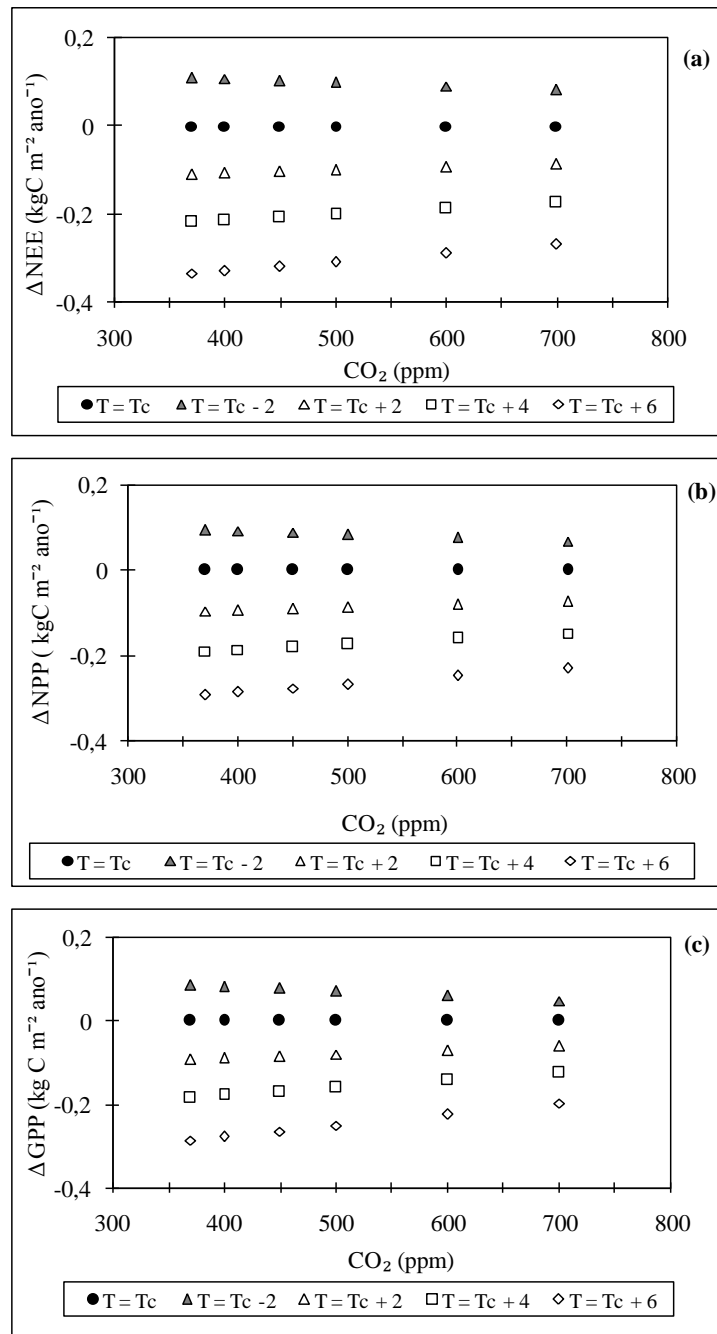


Figura 9- Gráfico com os efeitos de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE, em inglês), produtividade primária líquida (NPP, em inglês) e produtividade primária bruta (GPP, em inglês) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

3.3 Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar e da precipitação

A Figura 10 apresenta os gráficos dos cenários de aumento da concentração de CO₂ e variações na precipitação atmosférica considerando uma redução da temperatura do ar atual em 2°C para NEE (Fig. 10a), NPP (Fig. 10b) e GPP (Fig. 10c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. A redução da temperatura controle em 2°C incrementaria os valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂. Esse incremento foi modificado ao ser adicionado a variação da precipitação atual, sendo que o cenário de redução da precipitação controle em 50% diminuiu o efeito devido à redução da temperatura do ar, enquanto que o incremento provocado pelo aumento da precipitação em 50% não diferiu significativamente do incremento em função da redução da temperatura do ar controle em 2°C. Essa constatação foi verificada para o NEE e o NPP. Em relação ao GPP os valores do incremento devido à redução da precipitação controle em 50% seriam aproximadamente iguais aos valores da precipitação controle e para o aumento da precipitação controle em 50% o incremento segue o mesmo comportamento das outras variáveis.

A Figura 11 apresenta os efeitos do aumento da concentração de CO₂ e variações da precipitação atmosférica considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 11a), NPP (Fig. 11b) e GPP (Fig. 11c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos indicam que o efeito do incremento dos valores de NEE, NPP e GPP devido à redução da temperatura controle foi influenciado pela variação da precipitação, sendo os menores valores encontrados em simulações com a precipitação controle reduzidas em 50%, para todas as variáveis em análise. Assim, a redução da temperatura provocaria um incremento médio nos valores de NEE, NPP e GPP para qualquer concentração de CO₂ em 0,07; 0,03; 0,01Kg C m⁻²ano⁻¹ com redução da precipitação atual em 50% e em 0,11; 0,09; 0,08Kg C m⁻²ano⁻¹ com aumento da precipitação atual em 50%, respectivamente.

As Figuras 12 e 14 apresentam os gráficos dos cenários de aumento concentração de CO₂ e variações na precipitação atmosférica considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 12a), NPP (Fig. 12b) e GPP (Fig. 12c) e em 4°C para NEE (Fig. 14a), NPP (Fig. 14b) e GPP (Fig. 14c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. O

aumento da temperatura controle em 2°C e em 4°C reduziria os valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂. Os módulos do decréscimo dos valores de NEE, NPP e GPP variaram com a alteração da precipitação atual, sendo que, para o cenário de redução da precipitação controle em 50% intensificaria o efeito devido ao aumento da temperatura em 2°C como para 4°C nas variáveis, e o cenário de aumento da precipitação controle em 50% amenizaria esse efeito.

As Figuras 13 e 15 apresentam os efeitos do aumento da concentração de CO₂ e variações da precipitação atmosférica considerando o aumento da temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 13a), NPP (Fig. 13b) e GPP (Fig. 13c) e em 4°C para NEE (Fig. 15a), NPP (Fig. 15b) e GPP (Fig. 15c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Um incremento da precipitação controle em 50% seria benéfico para o NEE, NPP e GPP, pois reduziria o efeito devido ao aumento da temperatura controle em 2°C e em 4°C, enquanto que a redução da precipitação em 50% intensificaria o efeito do aumento da temperatura atual em 2°C e em 4°C. Deste modo, o aumento da temperatura causaria um decréscimo nos valores médios anuais de NEE, NPP e GPP em 0,12; 0,13; 0,14 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 13) e em 0,22; 0,22; 0,22 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 15) com redução da precipitação controle em 50%, e com aumento da precipitação atual em 50% diminuiria em 0,06; 0,03; 0,02 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 13) e 0,16; 0,12; 0,09 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 15), respectivamente, independentemente da concentração de CO₂.

A Figura 16 apresenta os gráficos dos cenários de aumento da concentração de CO₂ e variações na precipitação atmosférica considerando um aumento da temperatura do ar atual em 6°C para NEE (Fig. 16a), NPP (Fig. 16b) e GPP (Fig. 16c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. O incremento da temperatura atual em 6°C diminuiria os valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂. Quando o efeito da variação da precipitação atual foi adicionado, essa diminuição devido ao aumento da temperatura no NPP e no GPP é mais acentuada para o cenário de redução da precipitação atual em 50%, enquanto que, para o cenário de aumento da precipitação em 50%, os valores de NPP e GPP não diferem significativamente do incremento em função do aumento da temperatura do ar. Em relação ao NEE os valores do decréscimo devido à variação da precipitação controle em 50% são

aproximadamente iguais ao efeito provocado pelo aumento da temperatura do ar atual em 6°C.

A Figura 17 apresenta os efeitos do aumento da concentração de CO₂ e variações da precipitação atmosférica considerando um aumento da temperatura do ar atual em 6°C para NEE (Fig. 17a), NPP (Fig. 17b) e GPP (Fig. 17c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. O aumento da temperatura atual em 6°C tende a reduzir os valores de NEE, NPP e GPP e a magnitude dessa redução é influenciada pela variação da precipitação atual. Assim, quando é incorporado o decréscimo da precipitação controle em 50%, a redução dos valores de NPP e GPP devido ao aumento da temperatura atual é intensificada e quando a precipitação controle aumenta em 50% os valores tornam-se iguais aos encontrados perante o efeito do aumento da temperatura do ar em 6°C. A variação da precipitação não altera significativamente o efeito do aumento da temperatura atual em 6°C no NEE. Desta forma, o aumento da temperatura provocaria um decréscimo médio anual nos valores de NEE, NPP e GPP para qualquer concentração de CO₂ em 0,33; 0,31; 0,30 kg C m⁻²ano⁻¹ com decréscimo da precipitação atual em 50% e em 0,30; 0,26; 0,24 kg C m⁻²ano⁻¹ com incremento da precipitação atual em 50%, respectivamente.

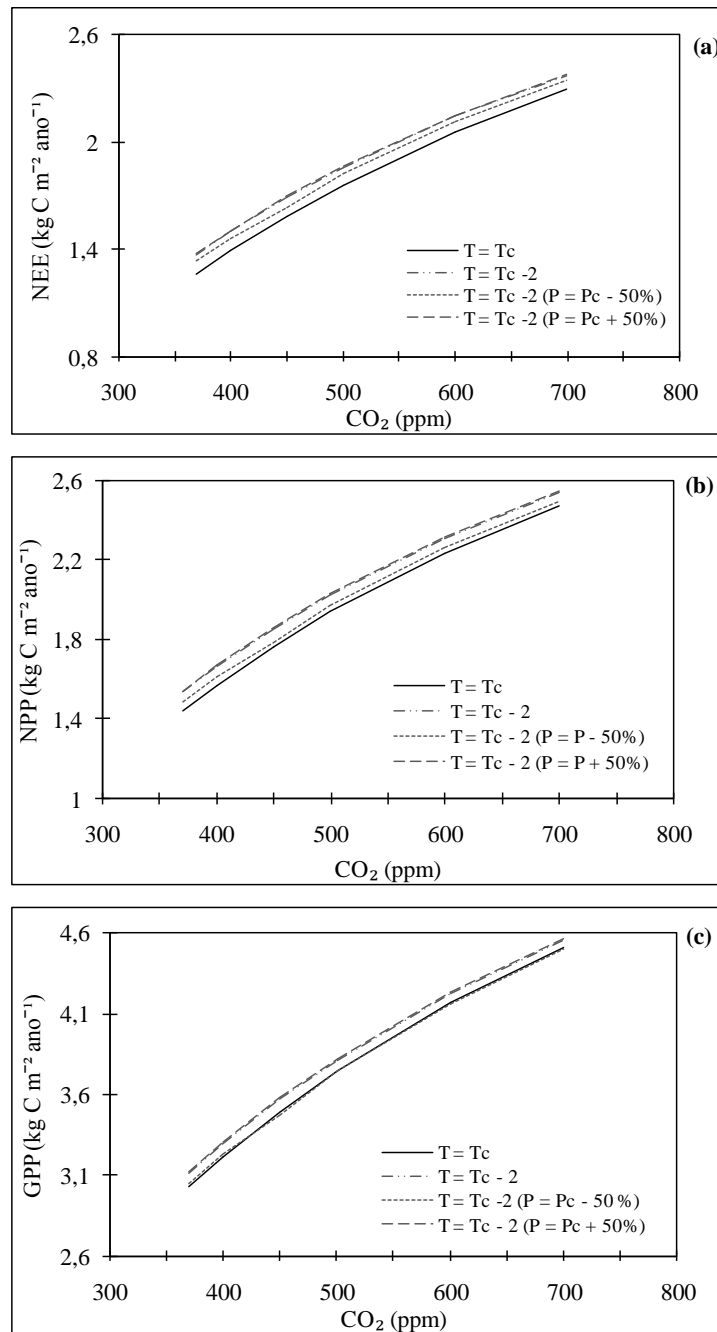


Figura 10- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

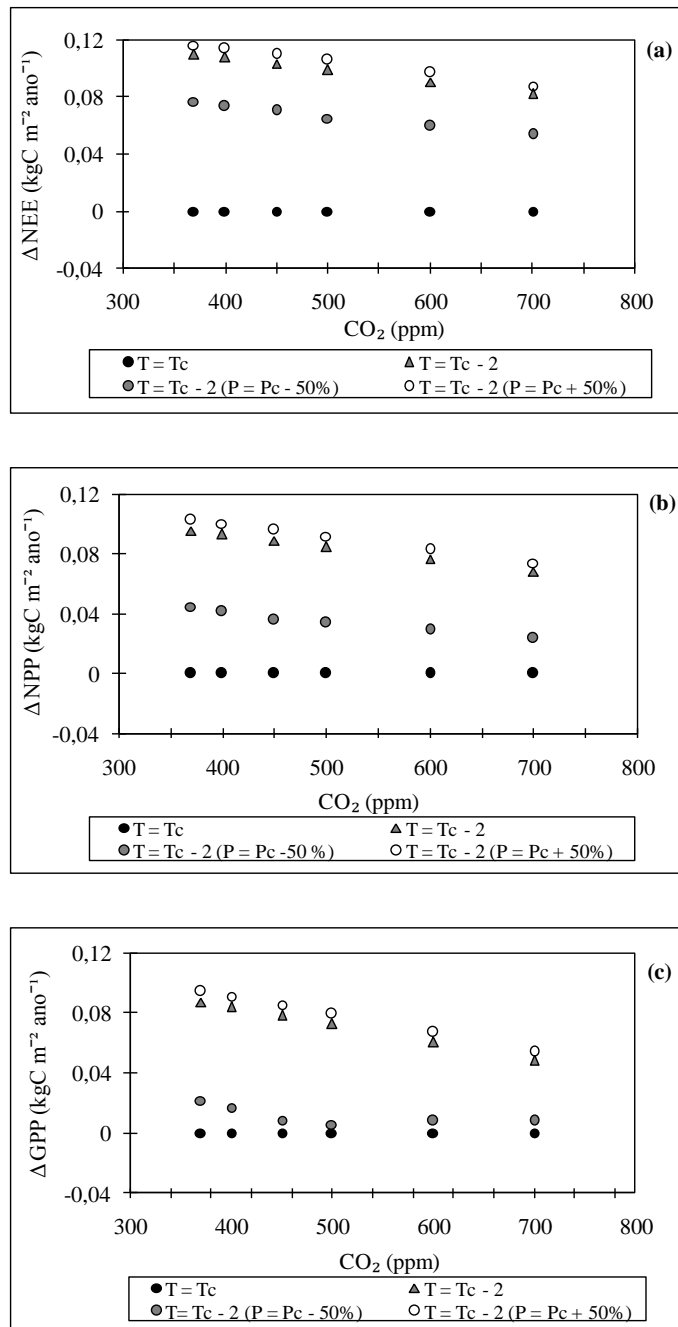


Figura 11- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

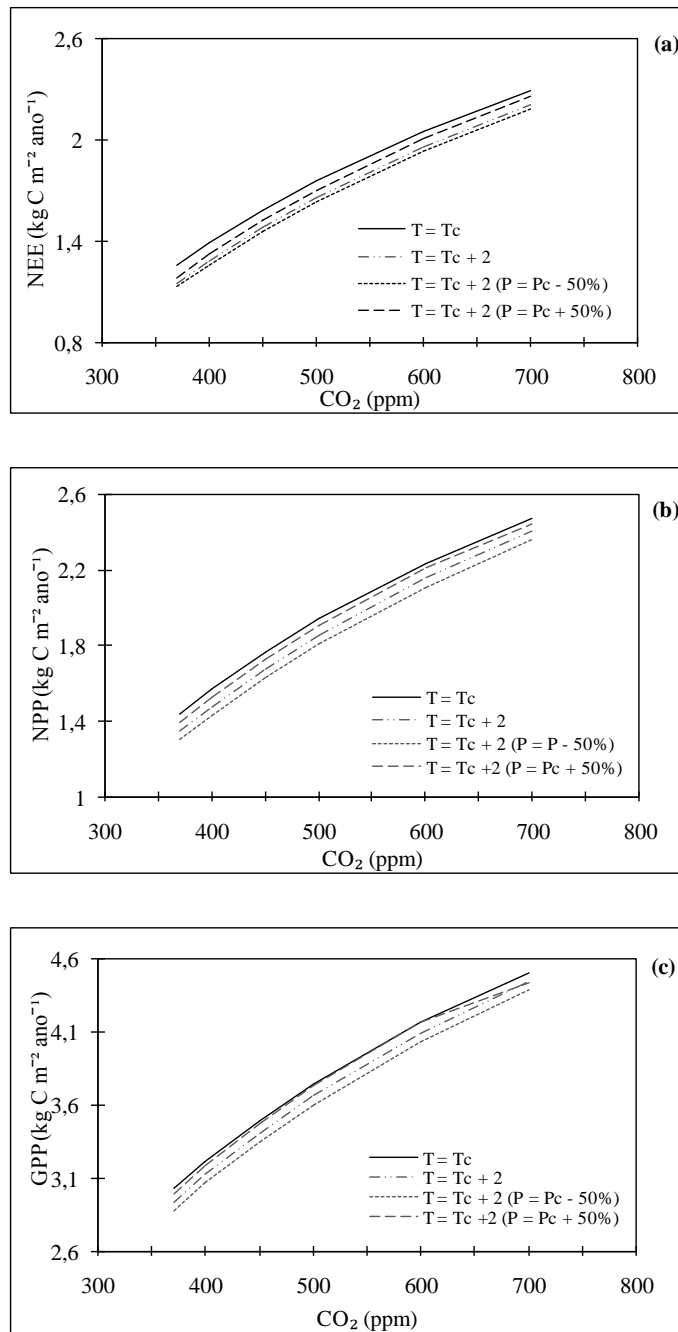


Figura 12- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

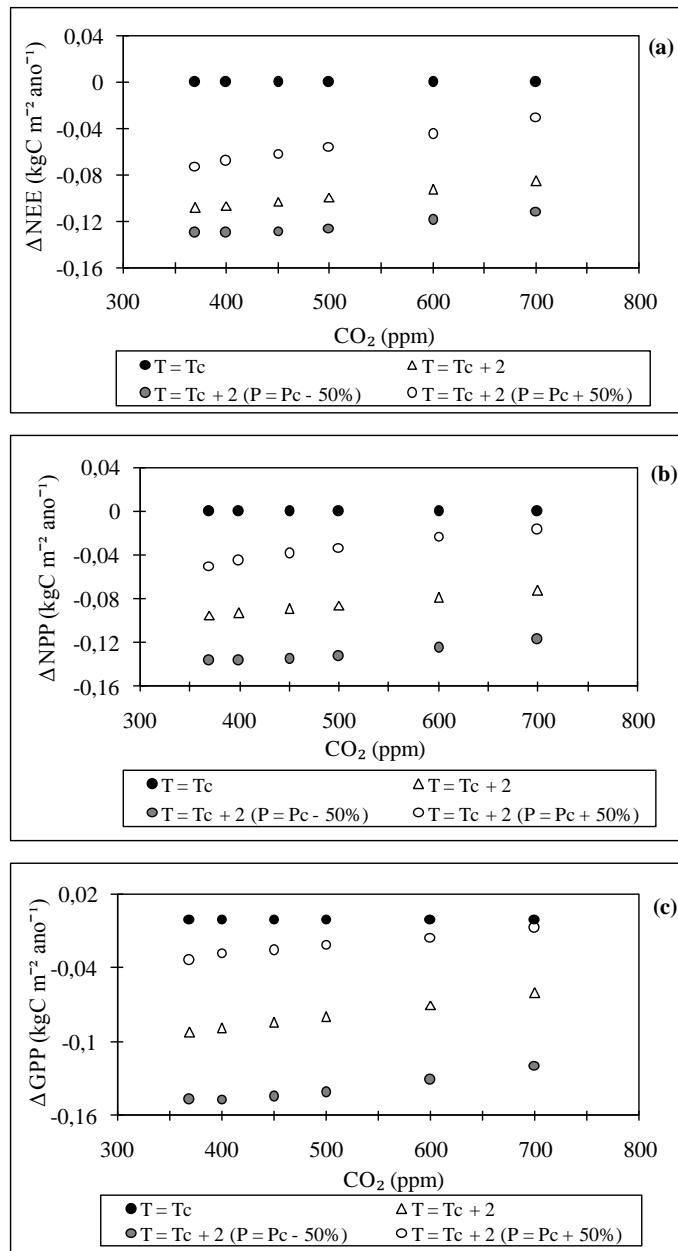


Figura 13-Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

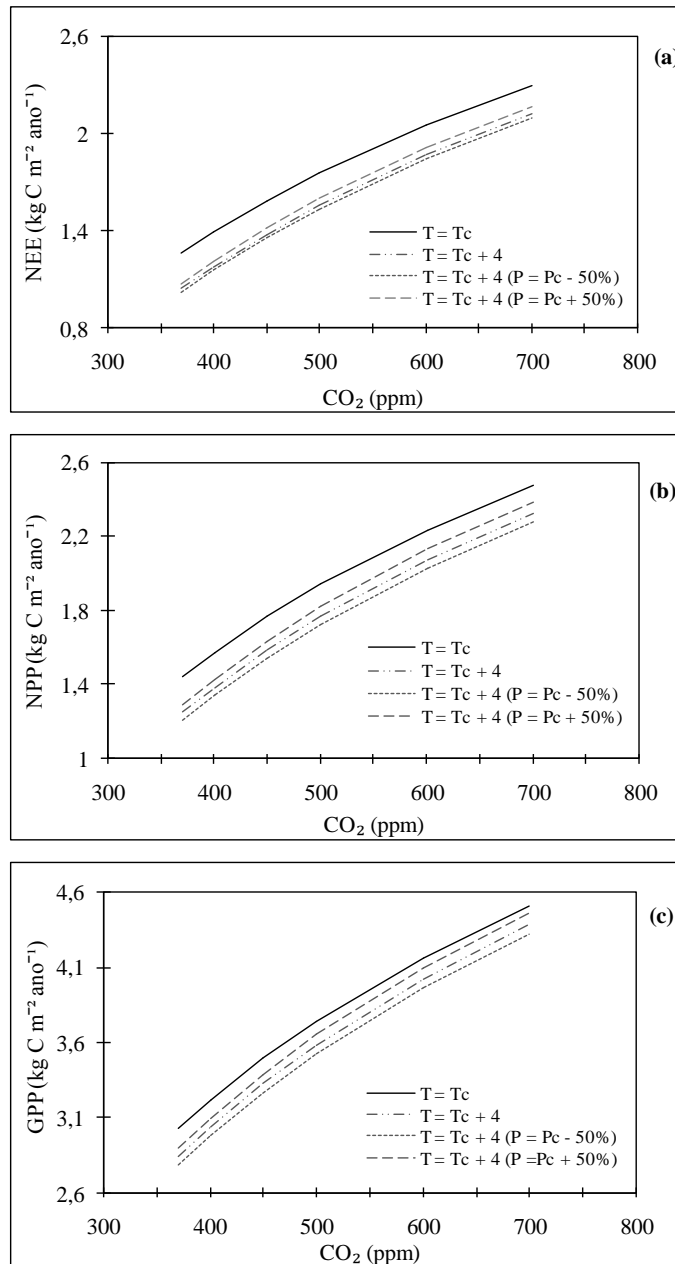


Figura 14- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

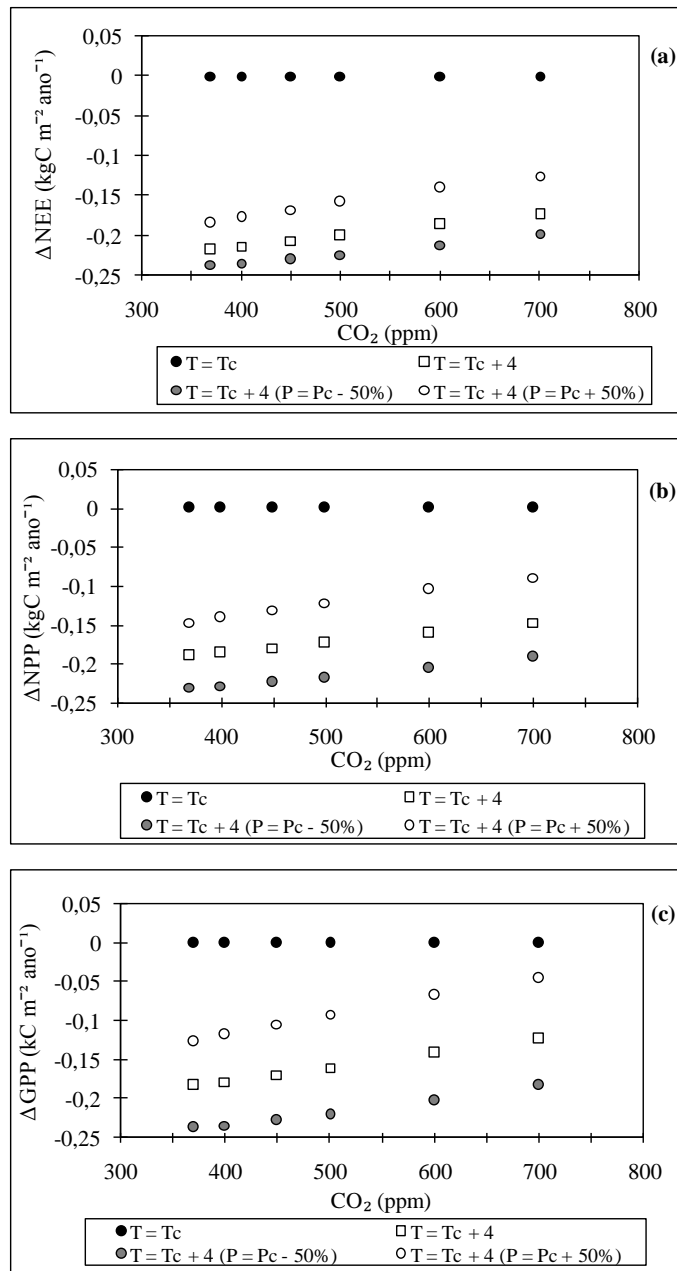


Figura 15- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

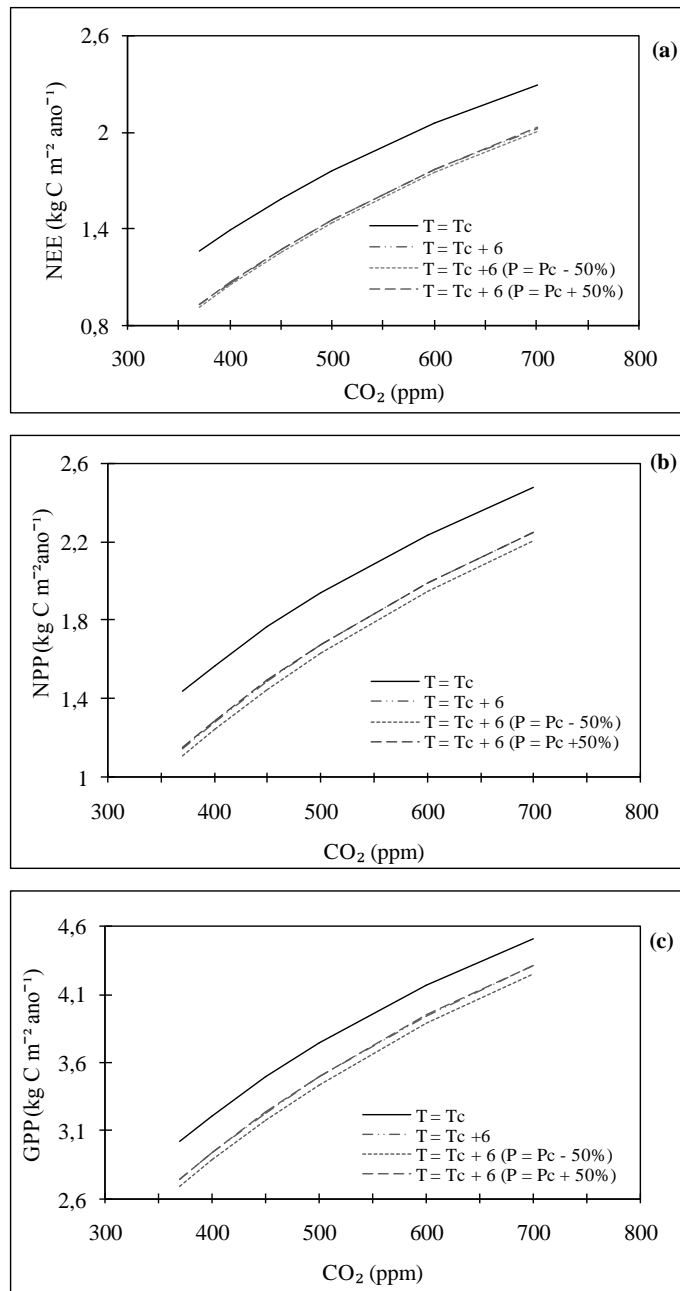


Figura 16- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

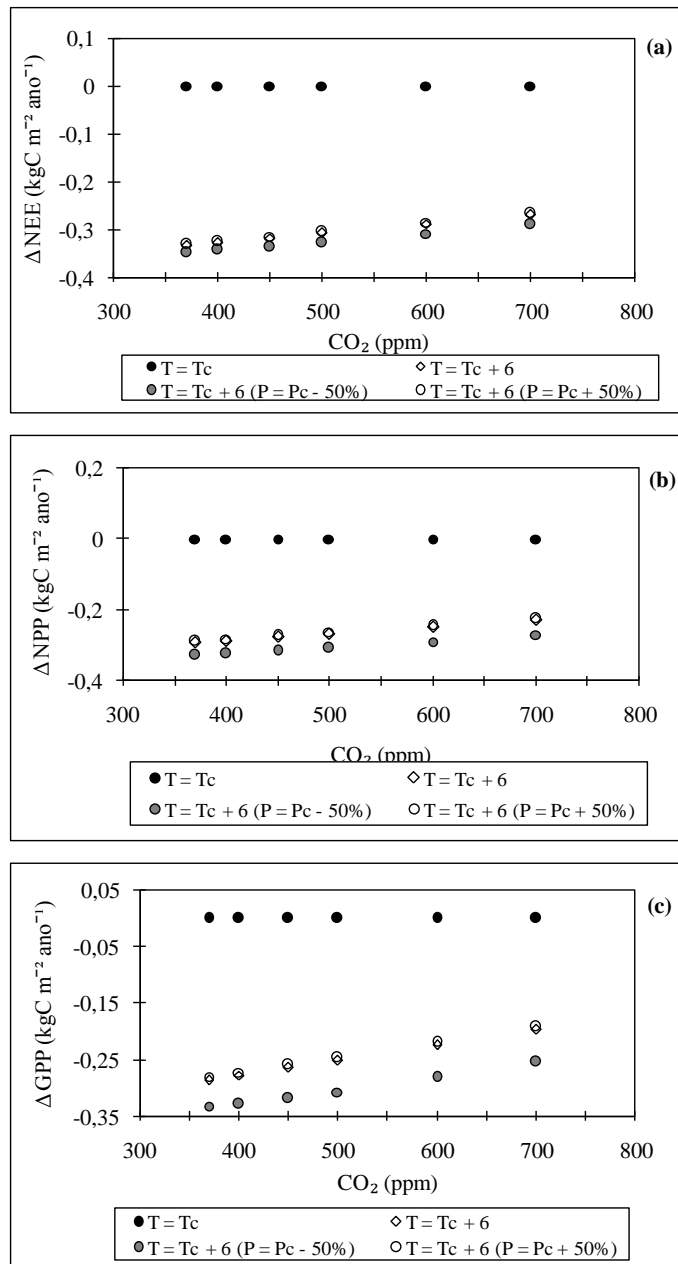


Figura 17- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e da produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

3.4 Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar e da umidade relativa do ar

A Figura 18 apresenta os gráficos dos cenários de aumento da concentração de CO₂, variações da temperatura do ar e da umidade relativa do ar com a temperatura para NEE (Fig. 18a), NPP (Fig. 18b) e GPP (Fig. 18c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos mostram que os valores de NEE, NPP e GPP aumentariam com o aumento da concentração de CO₂ para determinada temperatura do ar e diminuiriam com o aumento da temperatura do ar independentemente da concentração de CO₂, porém, para uma diminuição da temperatura atual em 2°C provocaria um aumento nos valores de NEE, NPP e GPP.

Os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações de temperatura do ar e da umidade relativa do ar em função da temperatura do ar para NEE, NPP e GPP, simulado pelo modelo de 1999 a 2001, estão apresentados na Figura 19 (NEE (Fig. 19a), NPP (Fig. 19b) e GPP (Fig. 19c). Os gráficos indicam que a redução da temperatura em 2°C da temperatura controle seria benéfica para o NEE, NPP e GPP, devido ao incremento médio anual dos seus valores em 0,13; 0,12; 0,14 kg C m⁻²ano⁻¹, respectivamente, para qualquer concentração de CO₂ atual adotada neste estudo. Entretanto, o aumento da temperatura do ar controle causaria uma redução nos valores de NEE, NPP e GPP em 0,13; 0,12; 0,14 kg C m⁻²ano⁻¹ com aumento da temperatura atual em 2°C, enquanto que com aumento da temperatura atual em 4°C diminuiria 0,25; 0,25; 0,29 kg C m⁻²ano⁻¹ e 0,38; 0,36; 0,42 kg C m⁻²ano⁻¹ com aumento da temperatura atual em 6°C, respectivamente, independentemente da concentração de CO₂.

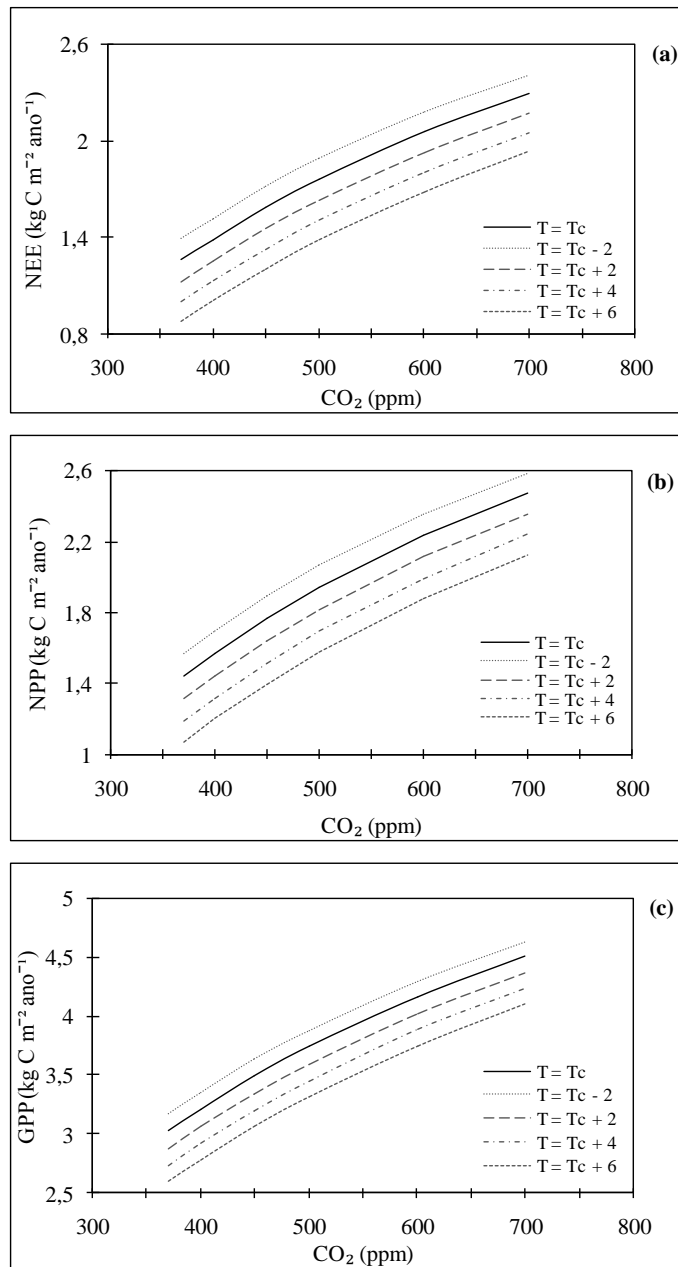


Figura 18- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, aumento da temperatura do ar e variações da umidade relativa do ar com a temperatura para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

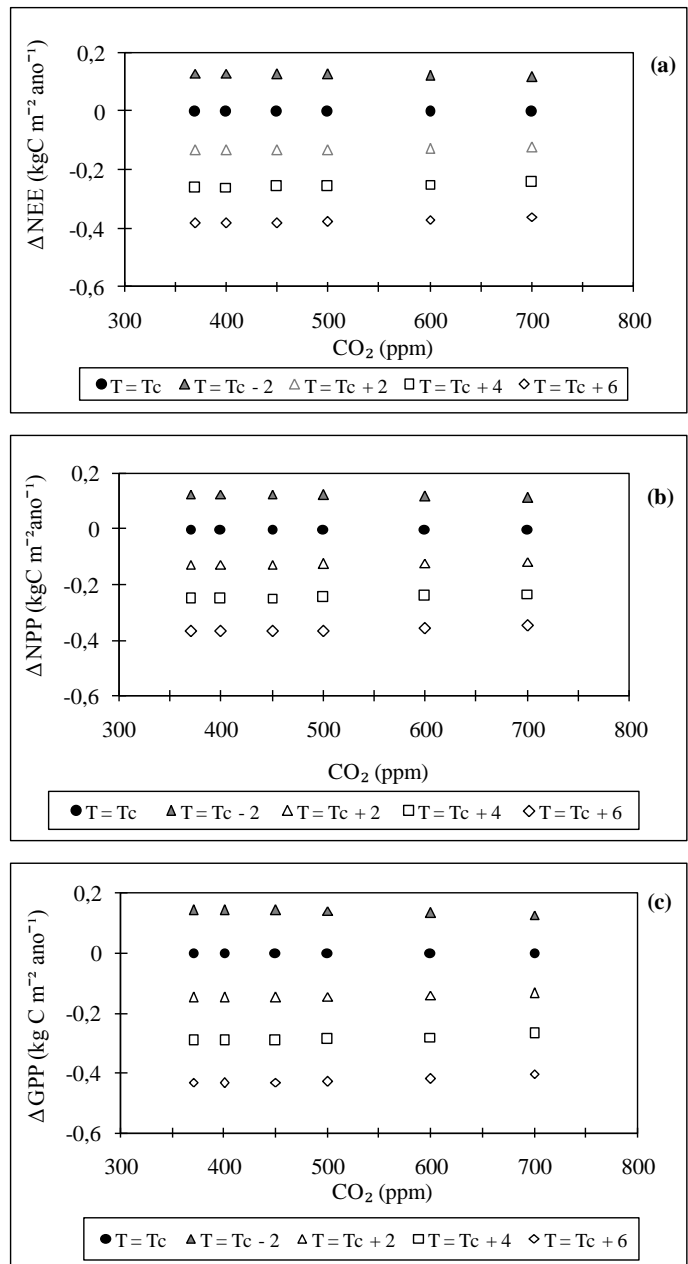


Figura 19- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, aumento da temperatura do ar e variações da umidade relativa do ar com a temperatura para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

3.5 Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar, da precipitação e da umidade relativa do ar

A Figura 20 apresenta os gráficos dos cenários de aumento da concentração de CO₂, variações na precipitação atmosférica e da umidade relativa do ar com a temperatura considerando uma redução da temperatura do ar atual em 2°C para NEE (Fig. 20a), NPP (Fig. 20b) e GPP (Fig. 20c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos mostram que o decréscimo da temperatura atual em 2°C provocaria um aumento nos valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂. O incremento da precipitação de controle em 50% não modificaria o efeito da temperatura para as variáveis em análise, porém o decréscimo na precipitação atual em 50% causaria uma ligeira diminuição no efeito devido à redução da temperatura atual para o NPP e o GPP. Para o NEE os valores do incremento devido à redução da precipitação de controle em 50% foram semelhantes aos seus valores tanto devido ao efeito de redução da temperatura como devido ao incremento da precipitação de controle em 50%.

A Figura 21 apresenta os efeitos do aumento da concentração de CO₂, variações da precipitação atmosférica e da umidade relativa do ar com a temperatura considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 21a), NPP (Fig. 21b) e GPP (Fig. 21c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Verifica-se nos gráficos da Figura 21 que há um incremento nos valores de NEE, NPP e GPP devido à redução da temperatura atual. Assim, a redução da temperatura provocaria um incremento médio nos valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂ em 0,11; 0,10; 0,11 kg C m⁻²ano⁻¹ com redução da precipitação atual em 50% e em 0,13; 0,13; 0,14 kg C m⁻²ano⁻¹ com aumento da precipitação atual em 50%, respectivamente.

A Figura 22 apresenta o gráfico de cenários de aumento concentração de CO₂, variações na precipitação atmosférica e da umidade relativa do ar com a temperatura do ar considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 22a), NPP (Fig. 22b) e GPP (Fig. 22c) simulados pelo modelo de 1999 a 2001. O incremento na temperatura controle em 2°C causaria uma redução nos valores de NEE, NPP e GPP independentemente da concentração de CO₂. Esse decréscimo nos valores de NEE, NPP e GPP variou quando foi

adicionada a variação da precipitação atual, onde o cenário de redução da precipitação de controle em 50% aumentou o efeito devido ao aumento da temperatura do ar atual em 2°C e o cenário de aumento da precipitação controle em 50% anula esse efeito, indicando valores de NEE, NPP e GPP bem próximos dos seus valores de controle.

A Figura 23 apresenta os efeitos do aumento da concentração de CO₂, variações na precipitação atmosférica e da umidade relativa do ar com a temperatura considerando o aumento da temperatura do ar controle em 2°C para NEE (Fig. 23a), NPP (Fig. 23b) e GPP (Fig. 23c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. O aumento da temperatura atual em 2°C provocaria um decréscimo nos valores médios anuais de NEE, NPP e GPP em 0,19; 0,21; 0,25 kg C m⁻²ano⁻¹ com redução da precipitação de controle em 50% e em 0,02; 0,03; 0,06 kg C m⁻²ano⁻¹ com aumento da precipitação atual em 50%, respectivamente, independentemente da concentração de CO₂.

As Figuras 24 e 26 apresentam os gráficos dos cenários de aumento concentração de CO₂, variações tanto na precipitação atmosférica como na umidade relativa do ar com a temperatura considerando um aumento da temperatura do ar controle em 4°C para NEE (Fig. 24a), NPP (Fig. 24b) e GPP (Fig. 24c) e em 6°C para NEE (Fig. 26a), NPP (Fig. 26b) e GPP (Fig. 26c) simulado pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos mostram que os valores de NEE, NPP e GPP decrescem com o aumento da temperatura controle em 4°C e em 6°C independentemente da concentração de CO₂. Quando foi incorporada a variação da precipitação atmosférica atual, houve alteração nos valores dessas variáveis, sendo os cenários de redução da precipitação de controle em 50% aumentou o efeito devido ao aumento da temperatura tanto para o aumento da temperatura atual em 4°C como para em 6°C, enquanto que os valores resultantes da adição do cenário de aumento da precipitação controle em 50% não diferiram significativamente dos valores devido ao efeito do aumento da temperatura atual tanto para 4°C como para 6°C.

As Figuras 25 e 27 apresentam os efeitos do aumento da concentração de CO₂, variações tanto na precipitação atmosférica como na umidade relativa do ar com a temperatura, considerando um aumento da temperatura atual em 4°C para NEE (Fig. 25a), NPP (Fig. 25b) e GPP (Fig. 25c) e em 6°C para NEE (Fig. 27a), NPP (Fig. 27b) e GPP (Fig. 27c) simulados pelo modelo de 1999 a 2001. Os gráficos indicam que o aumento da

temperatura causaria um decréscimo nos valores médios anuais de NEE, NPP e GPP em 0,34; 0,36; 0,44 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 25) e em 0,50; 0,52; 0,64 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 27) no cenário de redução da precipitação de controle em 50%, e em 0,25; 0,23; 0,27 kg C m⁻² ano⁻¹(Figura 25) e 0,36; 0,35; 0,40 kg C m⁻²ano⁻¹ (Figura 27) com aumento da precipitação atual em 50%, respectivamente, independentemente da concentração de CO₂.

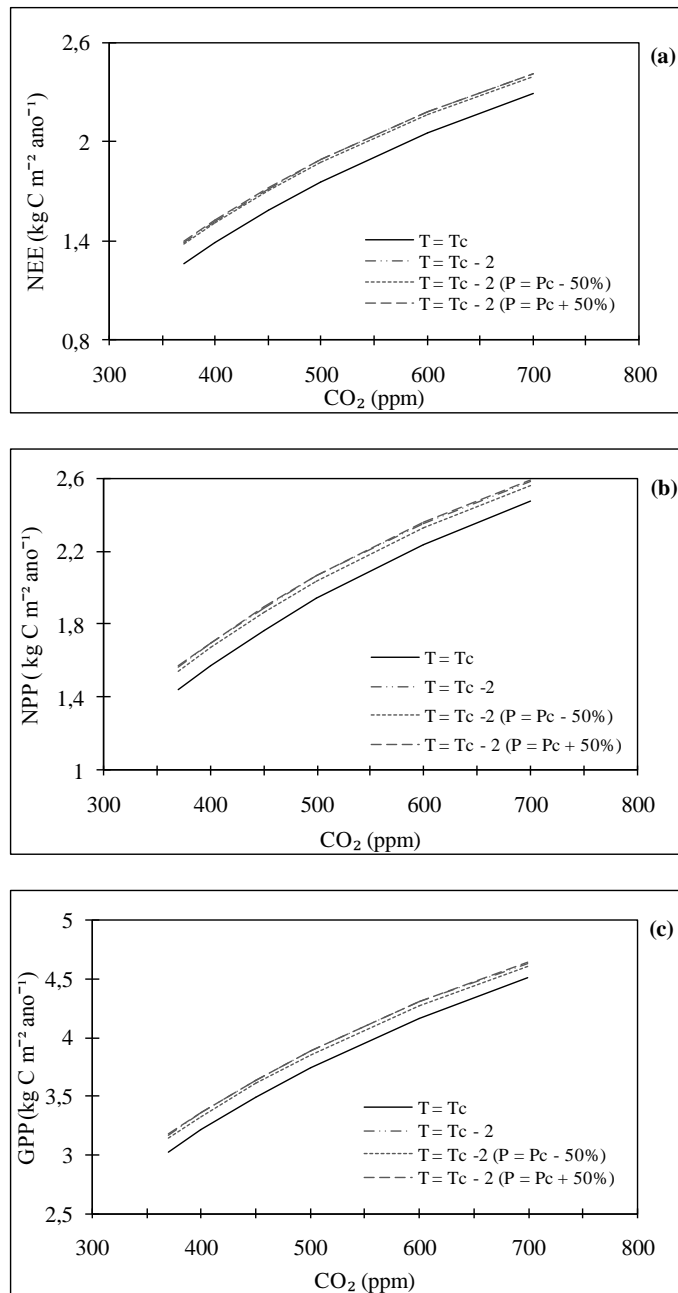


Figura 20- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

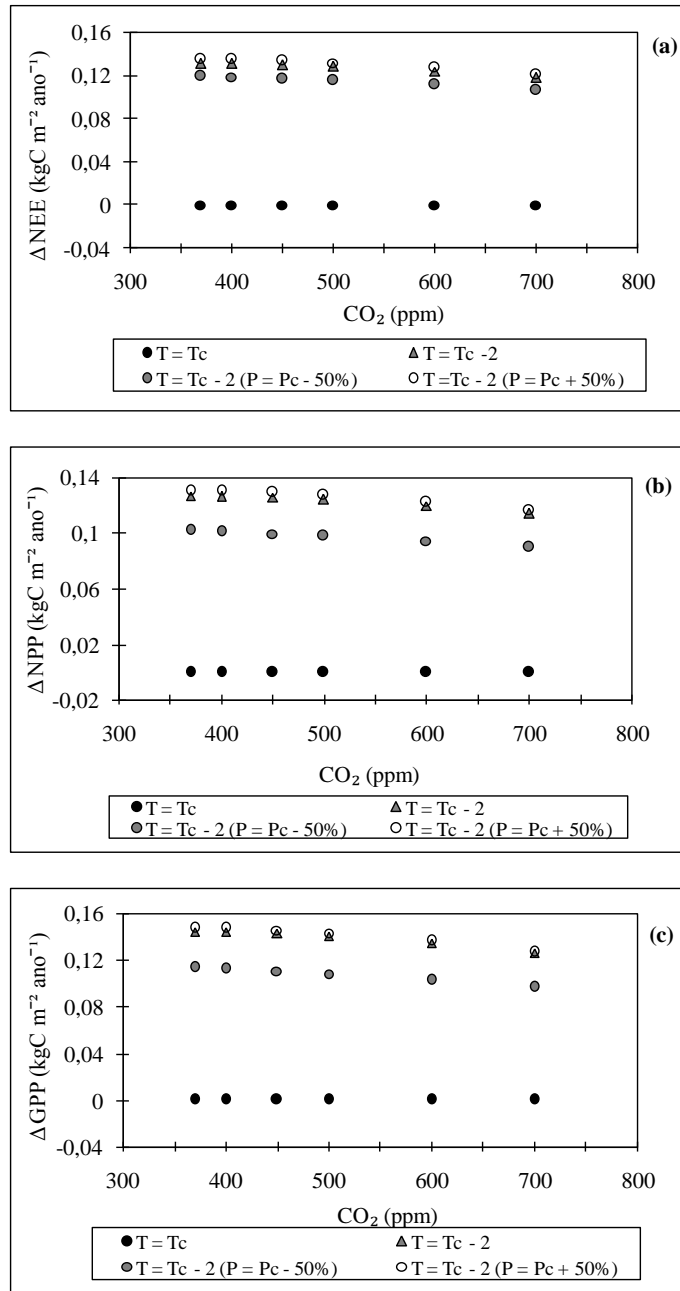


Figura 21- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

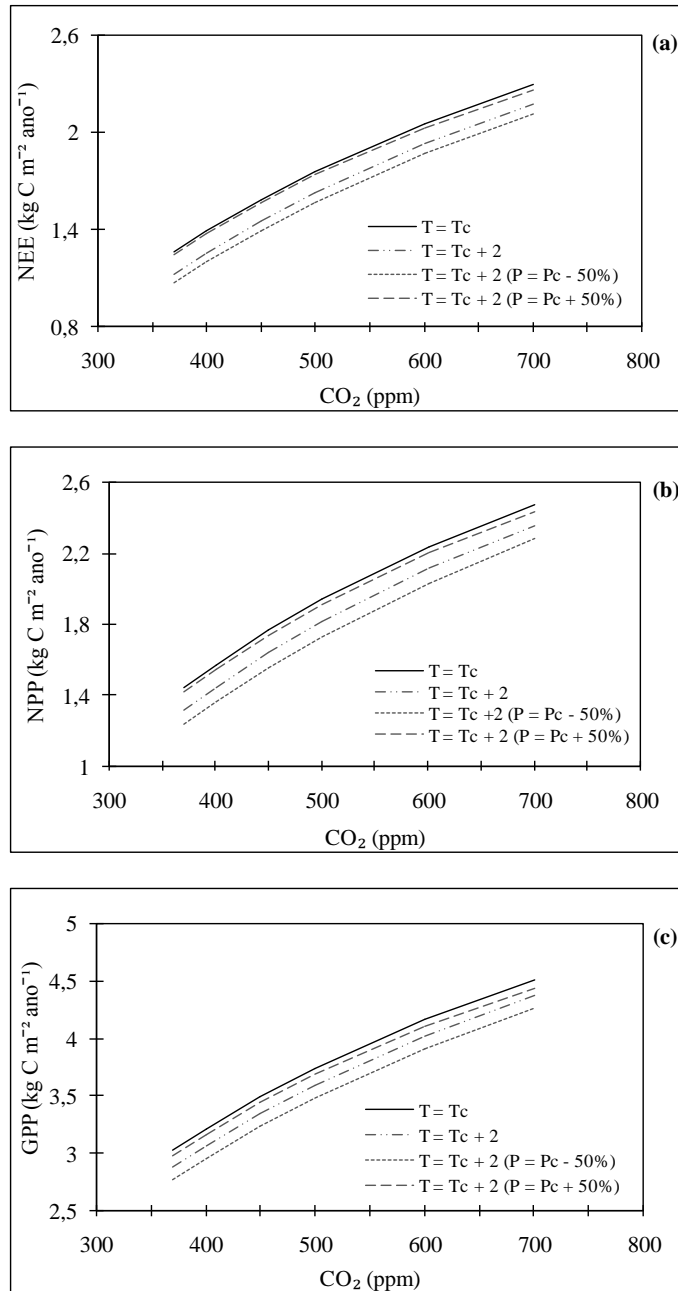


Figura 22- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

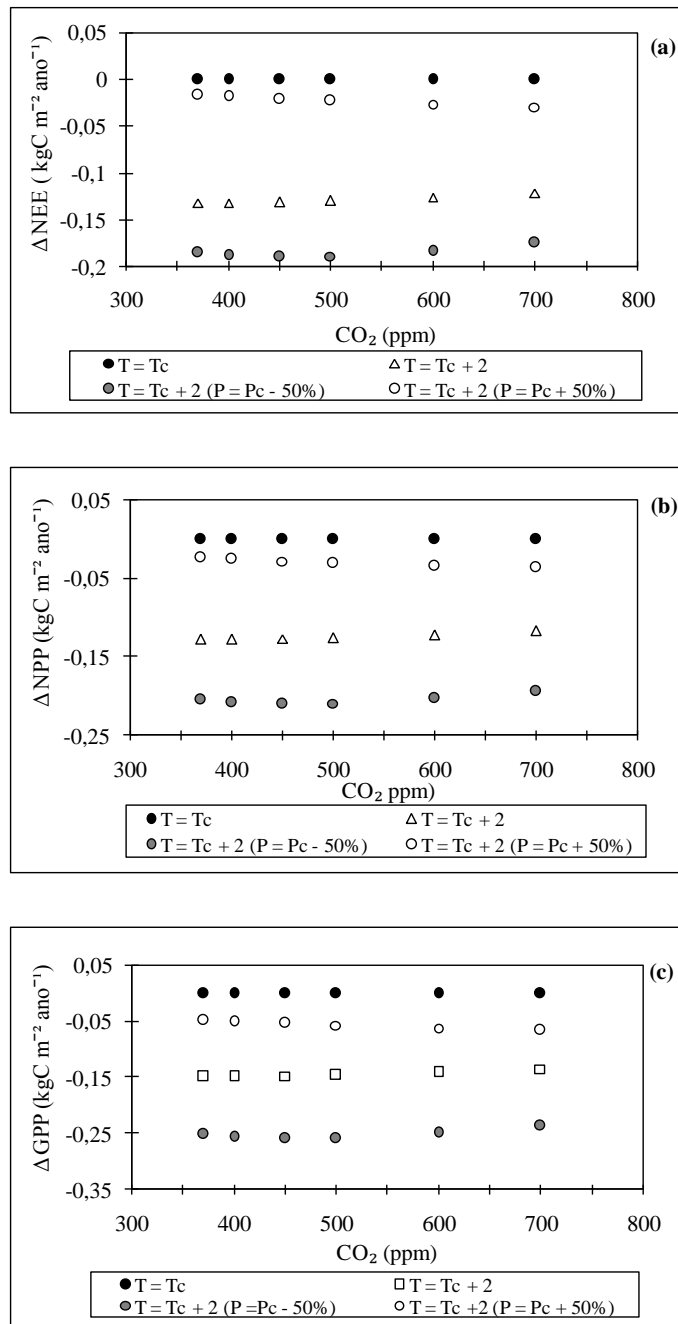


Figura 23- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação atmosférica e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 2°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

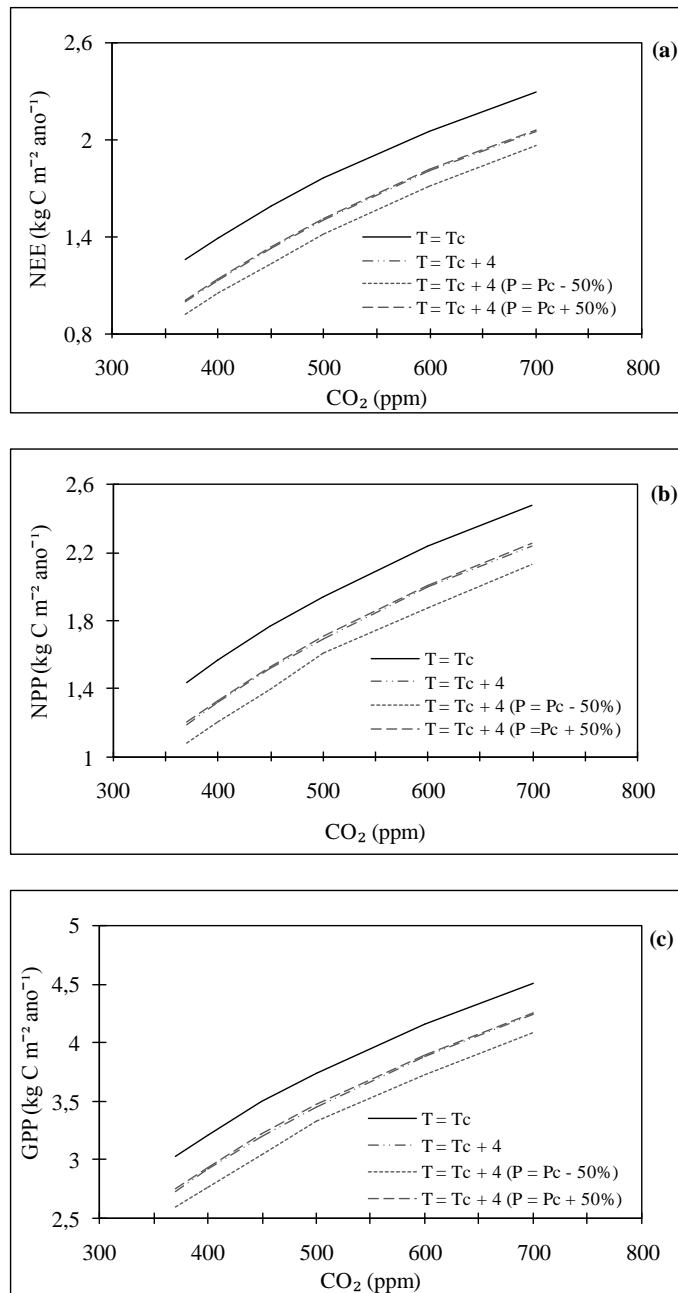


Figura 24- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

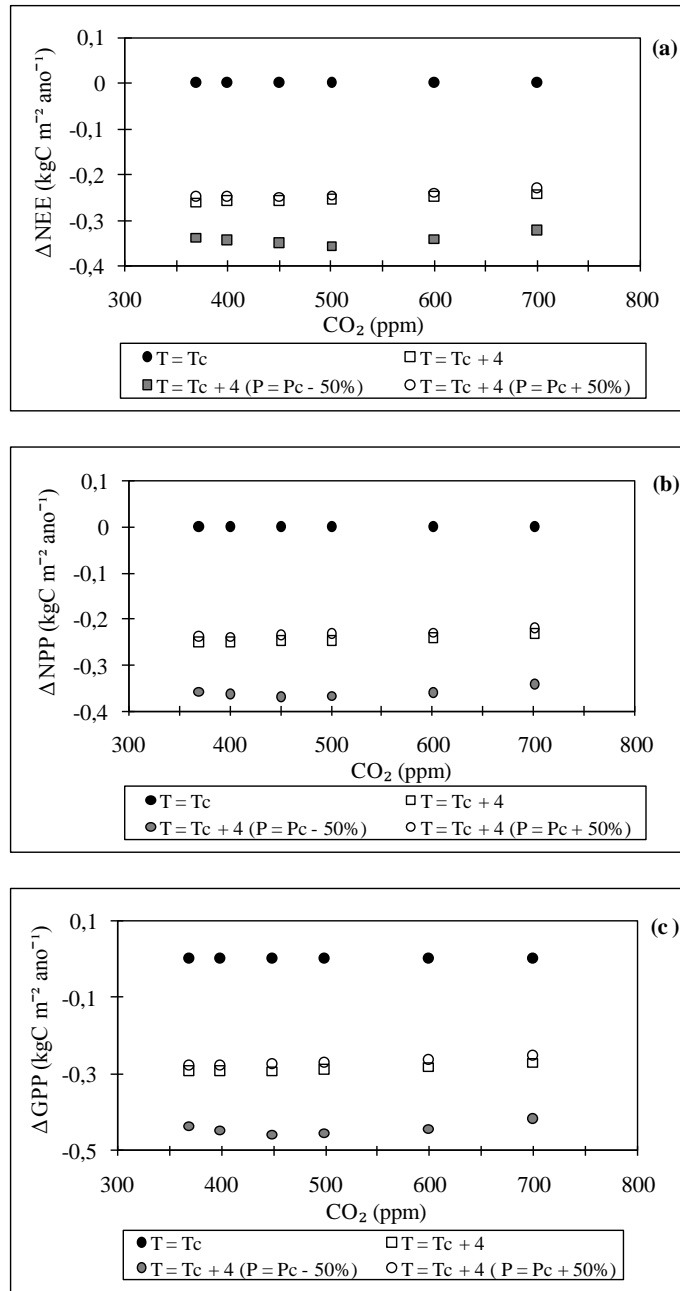


Figura 25- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

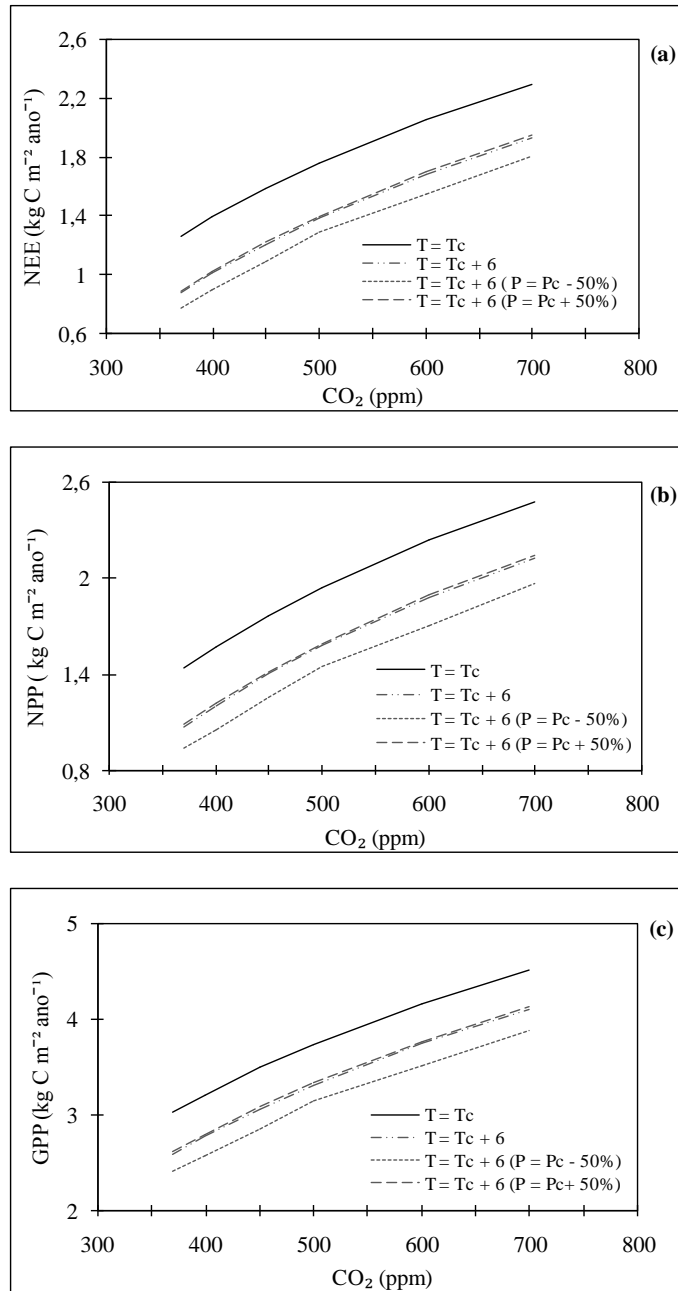


Figura 26- Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

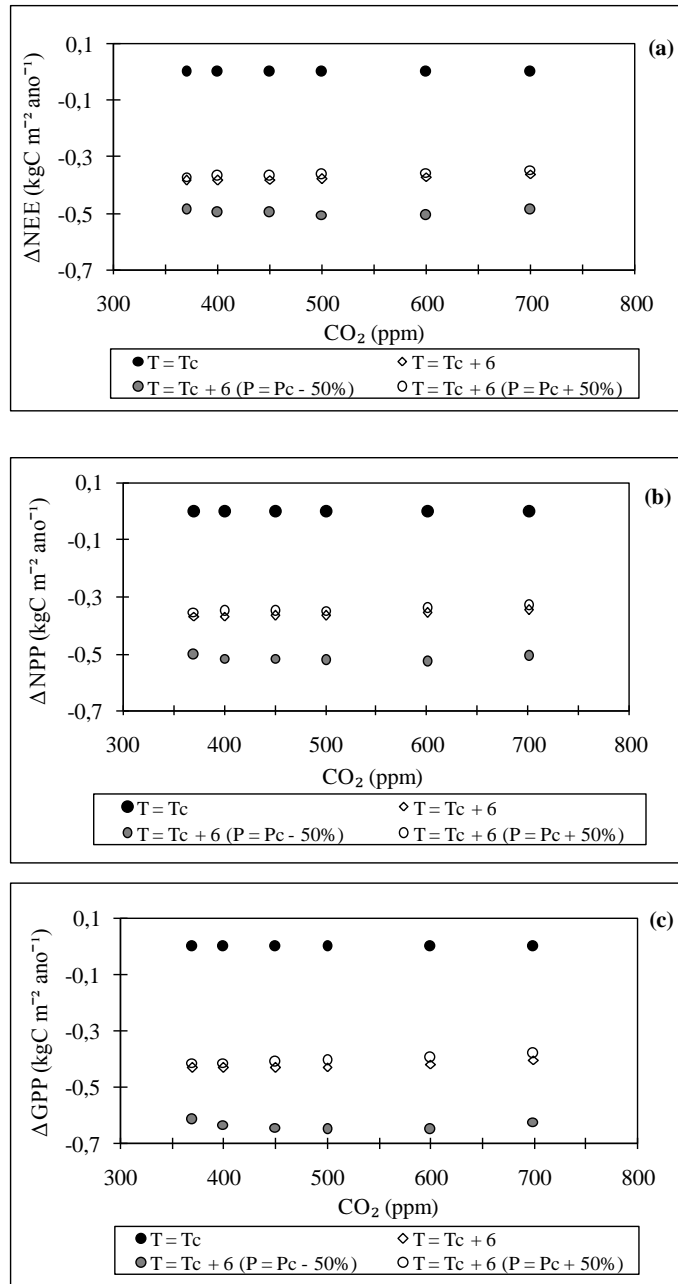


Figura 27- Gráficos com os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico, variações da precipitação e da umidade relativa do ar considerando aumento na temperatura do ar controle em 6°C para troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), produtividade primária líquida (NPP) e produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia no período de 1999 à 2001.

3.6 Discussão conjunta dos cenários 3.2, 3.3, 3.4, 3.5

O InLand constatou maior produtividade para pastagem com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico. Desta forma para um aumento de 130 ppm nas concentrações de CO₂ atmosférico observada de 1999 a 2001 produziu incremento de cerca de 0,716 kg C m⁻²ano⁻¹ no carbono efetivamente extraído da atmosfera pela pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia (GPP). Enquanto que nestas mesmas condições, o modelo indicou incremento de cerca de 0,501 kg C m⁻² ano⁻¹ na NPP, que representa a taxa de fixação de carbono pela pastagem e na NEE, que é o seqüestro ou entrada de carbono no sistema (valores negativos). O incremento nos valores de NEE, NPP e GPP com aumento da concentração de CO₂ é coerente com fato de que maiores concentrações de CO₂ promovem maiores taxas de fotossíntese favorecendo desta forma o aumento desses fluxos carbono (DRAKE, 1997; AINSWORTH e LONG, 2004).

As simulações com temperatura do ar maior que a temperatura atual apresentaram menores valores de NEE, NPP e GPP quando comparadas com os valores de controle para todas as concentração de CO₂ utilizadas durante as simulações. O aumento da temperatura do ar provoca o aumento das taxas respiratórias (DRAKE, 1997; MARENCO e LOPES, 2013) resultando na diminuição da fotossíntese líquida na medida em que as temperaturas médias do ambiente de crescimento ultrapassam a temperatura ótima e se aproximam para a temperatura máxima de letalidade (BONHOMME, 2000; LAMBERS et al., 2008). O aumento no consumo de fotoassimilados pela respiração, menor geração de NADPH (poder redutor) nas reações fotoquímicas em função da instabilidade de membranas (inibição no transporte de elétrons) e a redução da fotossíntese com o aumento da temperatura acima da faixa de temperatura ótima da *Brachiaria*, resulta em menor NPP.

Outro fator que pode ter contribuído para a redução do NEE, NPP e GPP em elevadas temperaturas é o aumento da demanda de vapor de água na atmosfera devido ao aumento da temperatura do ar provocando mais transpiração foliar até que o suplemento de água torne-se limitado e g_s diminuir levando a uma maior temperatura das folhas que pode resultar no fechamento dos estômatos e como consequência a taxa da fotossíntese diária diminui (HATFIELD e PRUEGER, 2015).

As temperaturas mais elevadas aumentam a perda de água através da transpiração, forçando as plantas a diminuírem as aberturas estomáticas, o que diminui a fotossíntese. Este efeito é contrariado pelo aumento da concentração de CO₂, que permite que as plantas assimilem o CO₂ através das aberturas estomáticas menores devido ao maior diferencial de concentração de CO₂ entre a atmosfera e a câmara subestomática das folhas. Estes dois efeitos opostos combinados com mudanças na precipitação atmosférica determinam a alteração líquida na produtividade biológica (CLAESSON e NYCANDER, 2013).

Em geral a redução da precipitação em 50% intensificou o efeito do aumento da temperatura do ar, embora em alguns casos essa intensificação não seja significativa quando comparadas com o efeito individual do aumento da temperatura (Fig. 19a).

O incremento da precipitação em 50% reduziu o efeito do aumento da temperatura do ar exceto quando a temperatura atual incrementou em 6°C (Fig. 19) onde a precipitação teve influência não significativa no efeito provocado pelo aumento temperatura do ar, que favoreceu o aumento do déficit de pressão de água na atmosfera e o fechamento de estômatos nas horas mais quentes do dia (MARENCO e LOPES, 2013). Situação contrária ocorreu perante um decréscimo na temperatura atual que favorece o incremento nos valores de NEE, NPP e GPP, em que a redução da precipitação diminui esse efeito benéfico da redução da temperatura e o incremento da precipitação aumenta ligeiramente esse efeito (Fig. 12 e 13). Essas constatações foram também verificadas nas simulações com ajuste da UR.

A determinação da UR em função da temperatura do ar nas simulações com InLand não interferiu nos resultados do comportamento das variáveis em análise, apenas aumentou os valores absolutos das mesmas, isso devido à alteração nos valores de UR nos dados de entrada do modelo.

Estudos realizados por Van Der Molen et al. 2011, também indicam uma redução do GPP durante o período de redução drástica da precipitação, pois a seca tem efeito direto no balanço de carbono terrestre por modificar tanto a taxa de carbono absorvido por fotossíntese e liberado pela respiração total do ecossistema. O carbono absorvido e liberado são funções não lineares que dependem entre outros fatores da disponibilidade de água e da temperatura. As variações na respiração total do ecossistema são determinadas pelo fornecimento de compostos de carbono orgânico produzidos pela fotossíntese que provavelmente diminuem no

período de ocorrência da seca, devido ao efeito da umidade do solo e da atividade enzimática que reduzem significativamente nesse período. Isso explica a tendência de redução tanto de GPP como respiração total do ecossistema.

O aumento da temperatura e redução da precipitação pode afetar diretamente na condutância estomática g_s devido aumento no déficit de pressão, ou pode ter efeito indireto em g_s de longo termo causado pela redução do conteúdo de água no solo. A condutância estomática g_s limita a fotossíntese A_n e, portanto o GPP (ROWLAND et al., 2015).

4. CONCLUSÕES

A validação dos fluxos de energia e carbono pelo InLand no modo single point para uma pastagem composta de *Brachiaria brizantha*, demonstrou a capacidade do modelo simular satisfatoriamente produtividade primária bruta (GPP), troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE), saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE), em termos de precisão (RMSE, MAE e MBE), exatidão (d), ajuste (gráfico de dispersão e de comportamento diário) e nível de significância para dados pareado (t). Assim, os resultados simulados pelo modelo InLand ajustam-se bem aos dados observados no sítio experimental de pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia, representando bem a variabilidade diurna da produtividade primária bruta (GPP) e da troca líquida de CO₂ no ecossistema (NEE). A exceção ocorre em alguns períodos onde o modelo superestima o GPP e em períodos noturnos onde os dados observados apresentam um comportamento dispersivo da NEE. Apesar do InLand simular satisfatoriamente as principais componentes do balanço de energia, nomeadamente, o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE), o modelo superestima os dados observados de LE (MBE=33,27 Wm⁻²) e subestima o H (MBE=-6,33 Wm⁻²).

A subestimação o H e NEE e superestimação LE e GPP pelo modelo, pode ter sido originada na qualidade dos dados observados medidos pelo método de covariância de vórtices turbulentos que nem sempre se ajustam as medições de energia disponíveis e dos fluxos de CO₂ noturno, principalmente em condições de baixa turbulência como ocorrem nas áreas extensas de pastagem. Além disso, a seleção do tipo de vegetação na configuração das simulações do modelo como vegetação estática, pode ter interferido na estimação dos fluxos de H e LE, visto que a variabilidade espacial e temporal da vegetação nas pastagens e o seu manejo (corte e/ ou períodos de rodízio) alteram os valores de H e LE significativamente nesses sistemas.

O efeito individual do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre a produtividade da *Brachiaria brizantha* em Rondônia é contrastado com o efeito gerado pelo aumento da temperatura do ar. Ou seja, o efeito individual da concentração de CO₂ atmosférico, para um valor de 500 ppm, que é a concentração sugerida pelo cenário mais pessimista do IPCC para

2050, produz um incremento de cerca de $0,716 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no carbono efetivamente extraído da atmosfera pela pastagem (GPP). Juntamente com o incremento de cerca de $0,501 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ na taxa de fixação de carbono pela pastagem (NPP) e de $0,501$ no sequestro ou entrada de carbono no sistema (NEE). Enquanto que o efeito individual do aumento da temperatura do ar, para uma concentração de CO_2 de 500 ppm, contribuiria com uma redução de $0,092$, $0,183$ e $0,285 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no GPP, $0,095$, $0,190$ e $0,292 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no NPP e $0,108$, $0,217$ e $0,334 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no NEE, para os intervalos de temperatura de 2, 4 e 6°C , respectivamente.

O efeito conjunto do aumento da concentração de CO_2 atmosférico com o aumento da temperatura do ar na pastagem indica uma redução na produtividade (NEE, NPP e GPP) independente da concentração de CO_2 . Porém, esse efeito conjunto ameniza a redução da produtividade, encontrado no cenário de efeito individual da temperatura, em cerca de $0,078$, $0,160$ e $0,250 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para GPP, $0,086$, $0,173$ e $0,267 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NPP e $0,099$, $0,200$; $0,308 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NEE, para o mesmo intervalo de incremento de temperatura e CO_2 . Quando adicionado a esse efeito conjunto a diminuição da precipitação controle em 50%, o efeito de redução na produtividade é intensificado para $0,141$, $0,221$ e $0,307 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em GPP, $0,133$, $0,219$ e $0,308 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NPP e $0,126$, $0,224$ e $0,327 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NEE. Enquanto com o aumento da precipitação controle em 50% temos uma amenização da perda de produtividade para $0,021$, $0,09$ e $0,245 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em GPP, $0,033$, $0,122$ e $0,263 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NPP e $0,055$, $0,158$ e $0,305 \text{ kg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para NEE. A tendência dos resultados encontrados neste trabalho não sofre alteração ao ser incorporada o ajuste da UR em função da temperatura do ar atual.

Os resultados desta pesquisa subsidiam informações importantes para futuras tomadas de decisão no âmbito da modelagem de interação solo-vegetação-atmosfera e na gestão das áreas de pastagem. Primeiramente, os resultados das simulações indicam que o efeito das forçantes relacionadas à mudança climática (aumento da concentração de CO_2 atmosférico e temperatura do ar) e ao desmatamento (mudanças na precipitação e umidade relativa do ar) é de redução na produtividade da *Brachiaria brizantha* em Rondônia. Segundo, existe uma expectativa de que a definição e a transferência dos princípios adequados do sistema de manejo possibilitem que cada vez mais os pecuaristas adotem esse sistema em suas propriedades. Assim, torna-se necessário a incorporação dos principais sistemas de manejo de

pastagem utilizados no país no InLand, para que o modelo possa representar os processos que ocorrem em campo de forma mais fiel possível. Terceiro, os parâmetros do InLand precisam ser calibrados para a pastagem, isso permite que os fluxos de energia, água e carbono sejam simulados mais próximo da realidade do sítio experimental. Quarto, incorporar no InLand as principais gramíneas utilizadas nas pastagens brasileiras, respeitando a individualidade dos aspectos fisiológicos e fenológicos. Porém deve-se ter em mente que as simulações realizadas por modelos são uma aproximação da realidade e não a verdade absoluta.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351–372, 2004. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x

AGUIAR, L. J. G. Balanço de Radiação em Áreas de Floresta e de Pastagem em Rondônia. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 70 p. 2007.

AMTHOR, J. S. Scaling CO₂-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. **Photosynthesis**, v. 39, p. 321-350, 1994. DOI: 10.1007/BF00014590.

ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; BRANÃO, C.; CARSWELL, F. E.; CICCIOLI, P. D. A.; COSTA, A. L.; CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; GASH, J. H. C.; GRACE, J.; KABAT, P.; LELIEVELD, J.; MALHI, Y.; MANZI, A. O.; MEIXENER F .X.; NOBRE, A. D.; NOBRE, C.; RUIVO, M. D. L.; SILVA, D. M. A.; STAFANI, P.; VALENTINE, R.; VON, J. J.; WATERLOO, M. J. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research**, v.107 (D20):8066, 2002. DOI: 10.1029/2001JD00052.

BALL, J. T.; WOODROW, I. E.; BERRY, J. A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different light conditions. **Progress in Photosynthetic Research**, v.953, p. 221-224, 1987. DOI: citeulike-article-id:8423355.

BENEZOLI, V. H. Efeito da mudança de cobertura do solo na vazão média anual na bacia do rio Xingu. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 34 p. 2014.

BONHOMME, R. Bases and limits to using ‘degree.day’ units. **European Journal of Agronomy**. v. 13, p. 1–10, 2000.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NOBRE, C. A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L. G.; FERREIRA, L. G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, p. 559–577, 2012. DOI: 10.1007/s10584-012-0443-3.

- CLAESSON, J.; NYCANDER, J. Combined effect of global warming and increased CO₂-concentration on vegetation growth in water-limited conditions. **Ecological Modelling**, v. 256, p. 23– 30, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.02.007.
- COLLATZ, G. J.; BALL, J. T.; GRIVET, C.; BERRY, J. A. Physiological and environmental Regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.54, p.107-136, 1991. DOI: 10.1016/0168-1923(91)90002-8.
- DA SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.103, p.357–362, 2004. DOI:10.1016/j.agee.2003.12.007.
- DA SILVA, S. F.; FERRARI, J. L. Descrição botânica, distribuição geográfica e potencialidades de uso da *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex. A. Rich) Stapf. **Enciclopédia biosfera, centro científico conhecer - Goiânia**, v. 8, p. 302-314, 2012.
- DIAS, L. C. P. Efeito da mudança na cobertura vegetal na evapotranspiração e vazão de microbacias na região do alto Xingu. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 80p. 2013.
- DRAKE B. G.; GONZÁLEZ-MELER M. A.; LONG S. P.; More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 609–639, 1997.
- FARQUHAR, G. D.; CAEMMERER, V. S.; BERRY, J. A. A biogeochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Ann. Rev Plant Physiol**, v.149, p.78-90, 1980.
- FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal conductance and photosyntheses. **Ann. Rev. Plant Physiol**, v.33, p.317-345, 1982. DOI: 10.1146/annurev.pp.33.060182.001533.
- FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. Production systems – An example from Brazil. **Meat Science**, v. 84, p.238-243, 2010. DOI: 10.1016/j.meatsci.2009.06.006.

FISHER, R. A.; WILLIAMS, M.; DA COSTA, A. L.; MALHI, Y.; DA COSTA, R. F.; ALMEIDA, S.; MEIR, P. The response of an Eastern Amazonian rain forest to drought stress: results and modelling analyses from a throughfall exclusion experiment. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2361–2378, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01417.x

FOLEY, J. A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosfera model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v.10, p. 603-628, 1996.

FONSECA, D. M. D.; MARTUSCELLO, J. A. Plantas Forrageiras. 1ª edição. Ed.UFV, Viçosa- MG, p.13, 2010.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. P. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, 2015. DOI: 10.1016/j.wace.2015.08.001.

IBGE(Instituto Brasileiro de Geografia a e Estatística). **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/brasil_2006/Brasil_censoagro2006.pdf>. Acesso em: 4 de fev. 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia a e Estatística). IBGE Cidades. Disponível em : <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php> > Acesso em: 10 mar. 2014.

IMBUZEIRO, H. M. A. Calibração do Modelo IBIS na floresta Amazônica Usando Múltiplos Sítios. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 67p. 2005.

LAMBERS, H.; CHAPIM III. E.S.; PONS, T. L. Plant physiological ecology. 2nd ed. New York: Springer, 2008. 604 p.

LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 426–443, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.093.

LEUNING, R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. **Plant, Cell and Environment**, v.18, p. 339-355, 1995.

LOSSAU, S.; FISCHER, G.; TRAMBERED, S.; VAN VELTHUIZEN, H.; KLEINSCHMIT, B.; SCHOMACKER, R. Brazil's current and future land balances: Is there residual land for bioenergy production? **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 452-461, 2015.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. Fisiologia Vegetal: Fotossíntese, Respiração, Relações Hídricas e Nutrição Mineral. 3ª edição. Ed. UFV. Viçosa- MG, p. 486. 2013.

NEPSTAD, D. C.; MOUTINHO, P.; DIAS, M. B.; DAVIDSON, E.; CARDINOT, G.; MARKEWITZ, D.; FIGUEIREDO, R.; VIANNA, N.; CHAMBERS, J.; RAY, D.; GUERREIROS, J. B.; LEFEBVRE, P.; STERNBERG, L.; MOREIRA, M.; BARROS, L.; ISHIDA, F. Y.; TOHLVER, I.; BELK, E.; KALIF, K.; AND SCHWALBE, K. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. **Jornal of Geophysical Research**, v.107, NO. D20, 8085, 2002.DOI:10.1029/2001JD000360.

OLIVEIRA, L. J. C; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S.; COE, M. T. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 024021 (10pp), 2013. DOI:10.1088/1748-9326/8/2/02402.

PIRES, G. F. Climate change and the sustainability of agricultural productivity in Brazil. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 69p. 2015.

ROWLAND, L.; HARPER, A.; CHRISTOFFERSEN, B. O.; GALBRAITH, D. R.; IMBUZEIRO, H. M. A.; POWELL, T. L.; DOUGHTY C.; LEVINE, N. M.; MALHI, Y.; SALESKA, S. R.; MOORCROFT, P. R.; MEIR, P.; WILLIAMS, M. Modelling climate change responses in tropical forests: similar productivity estimates across five models, but different mechanisms and responses. **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 1097 – 1110, 2015. DOI: 10.5194/gmd-8-1097-2015.

SILVA, E. A. D. da. Influence of climate, fire and phosphorus in the dynamics of vegetation in the Amazon-Cerrado border simulated with INLAND model. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 75 p. 2015.

STÖCKLI, R.; RUTISHAUSER, T.; DRAGONI, D.; O'KEEFE, J.; THORNTON, P. E.; JOLLY M.; LU, L.; DENNING, A. S. Remote sensing data assimilation for a prognostic

phenology model, J. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, G04021, 2008. DOI:10.1029/2008JG000781.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 3ª edição. Ed. Artimed. Porto Alegre p. 210-211. 2004.

VALE, P. M.; ANDRADE, D. C. Comer carne e salvar a Amazônia? A produtividade da pecuária em Rondônia e sua relação com o desmatamento. **Estud. Soc. e Agric.**, v. 20, p. 281 – 408, 2012.

VAN DER MOLEN, M. K.; DOLMAN, A.J.; CIAIS, P.; EGLIN, T.; GOBRON, N.; LAW, B. E.; MEIR, P.; PETERS, W.; PHILLIPS, O. L.; REICHSTEIN, M.; CHEN, T.; DEKKER, S. C.; DOUBKOVÁ, M.; FRIEDL, M. A.; JUNG, M.; VAN DEN HURK, B. J. J. M.; DE JEU, R. A. M.; KRUIJT, B.; OHTA, T.; REBEL, K. T.; PLUMMER, S.; SENEVIRATNE, S. I.; SITCH, S.; TEULING, A.J.; VAN DER WERF, G. R.; WANG, G. Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, p. 765-773, 2011. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.01.018.

WILLMOTT, C. J. On the Validation of Models. **Physical Geography**, v. 2, p.184–194, 1981. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climatic Research**, v. 30, p. 79–82, 2005. DOI: 10.3354/cr030079.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J. G.; RANDOW, C. V.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 39, p. 335-348, 2009.

6. APÊNDICE

Apêndice A. Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar considerando umidade relativa do ar igual ao controle.

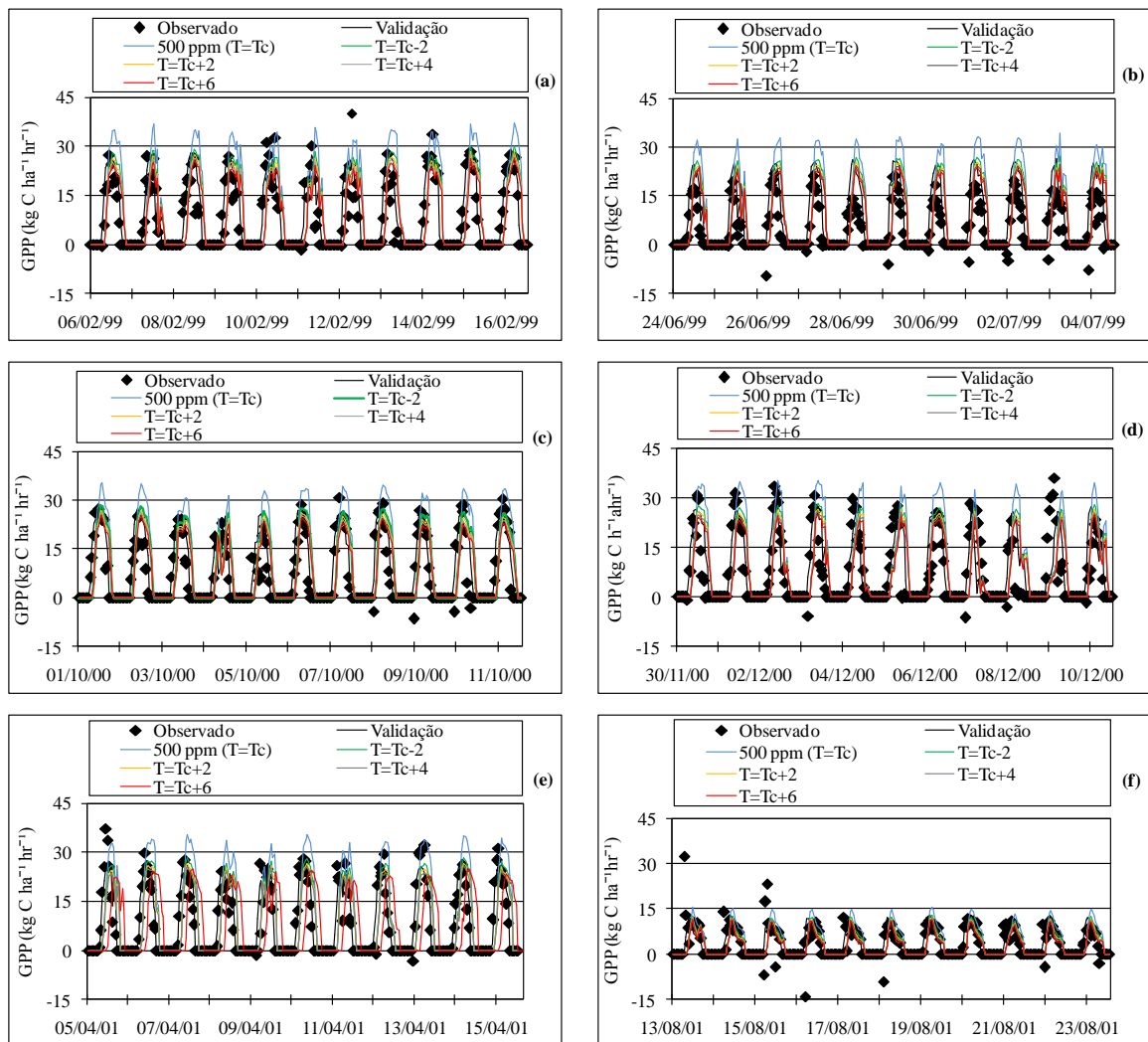


Figura A1. Gráfico com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

Apêndice B. Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar e da precipitação considerando umidade relativa do ar igual ao controle.

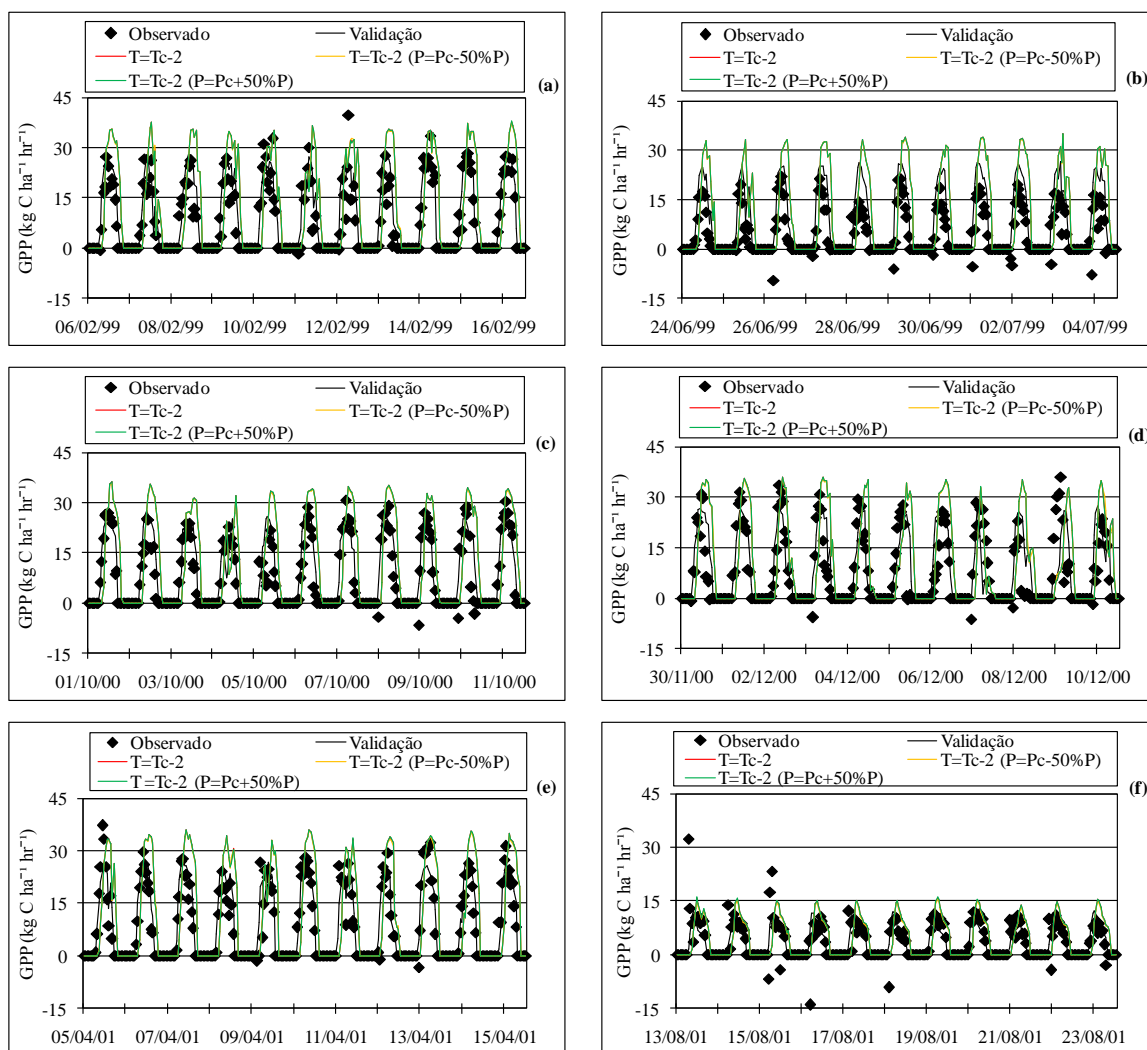


Figura B1. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

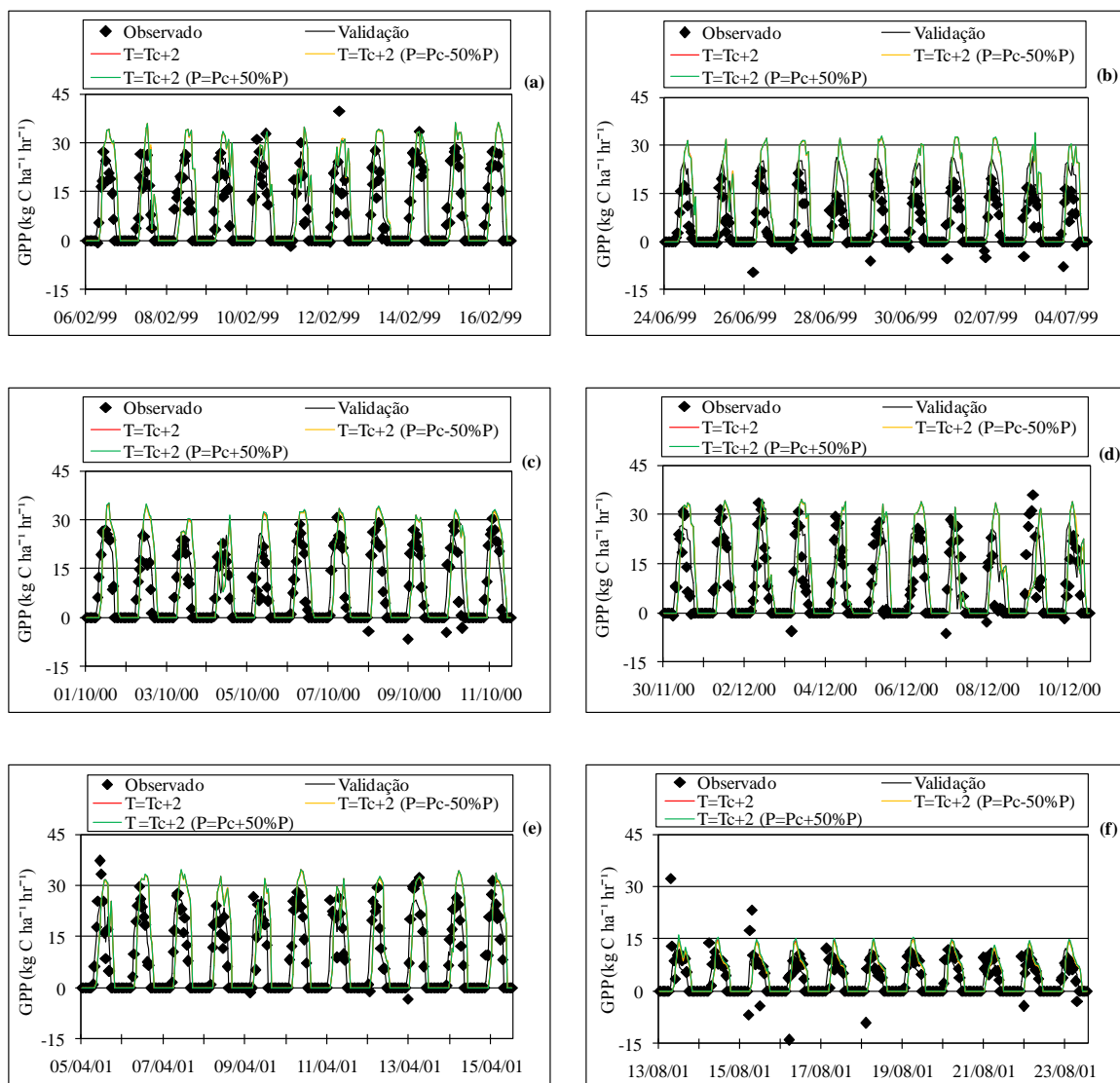


Figura B2. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO_2 atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias seleccionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

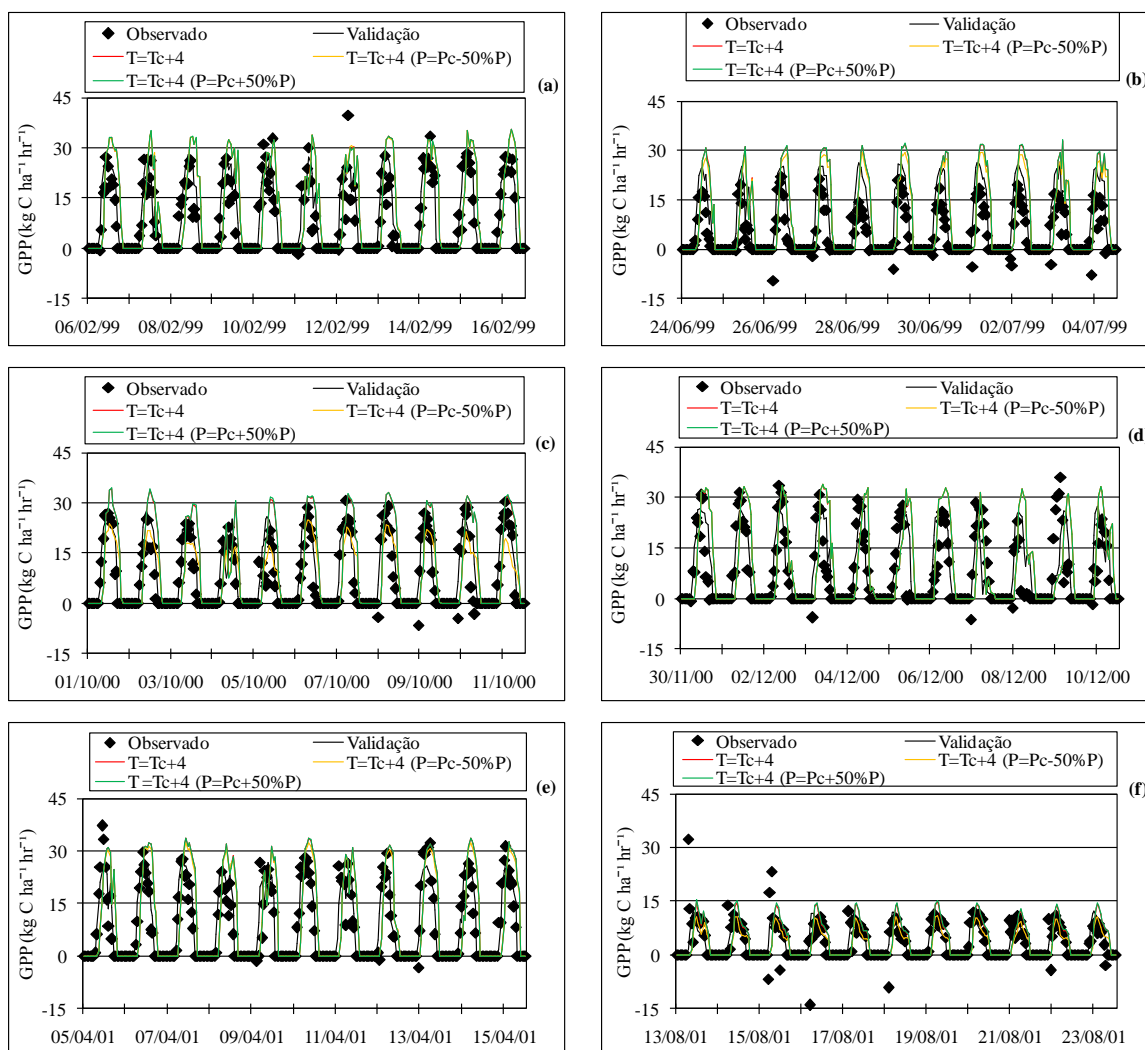


Figura B3. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO_2 atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

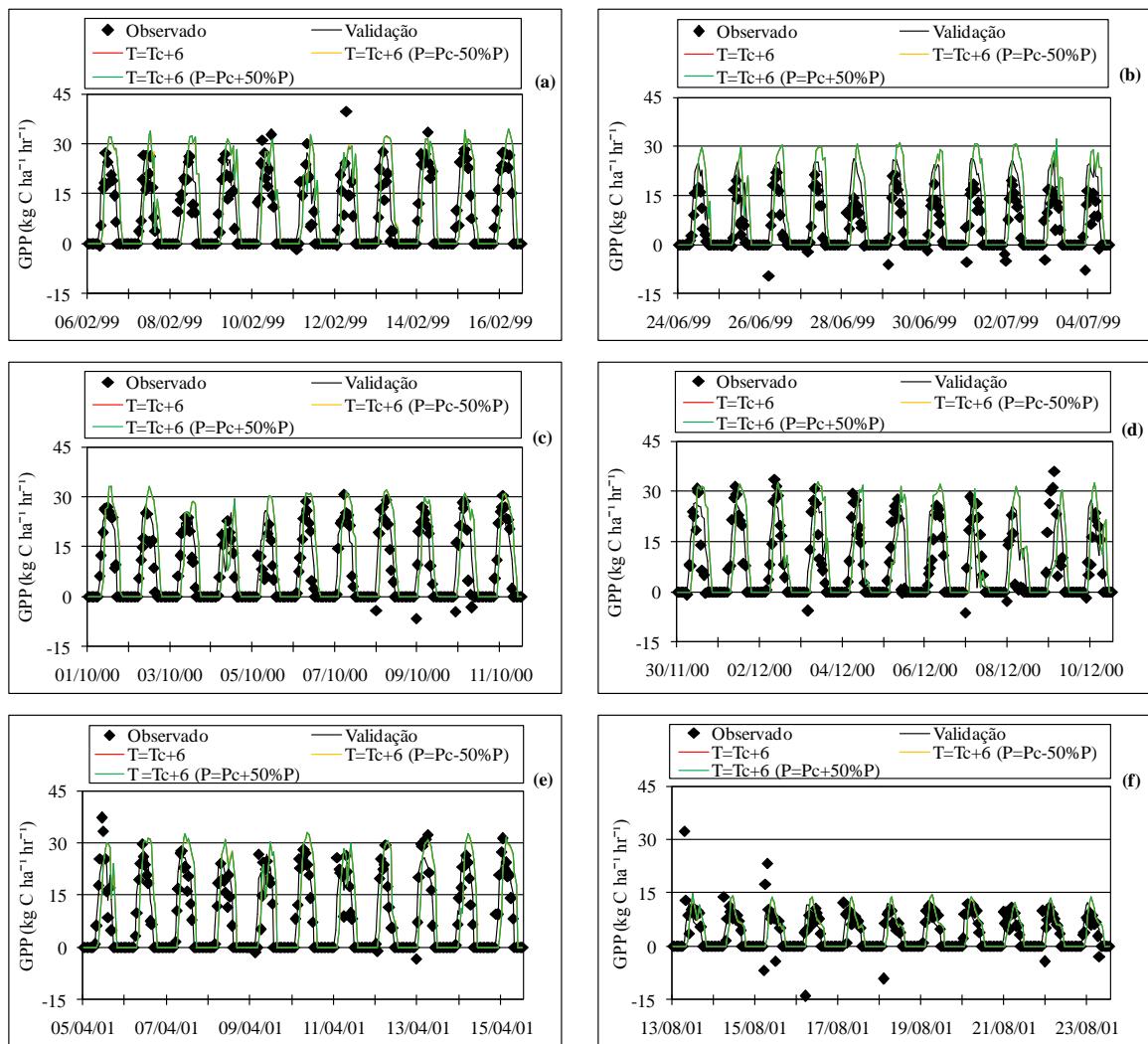


Figura B4. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO_2 atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

Apêndice C. Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar considerando UR igual ao controle.

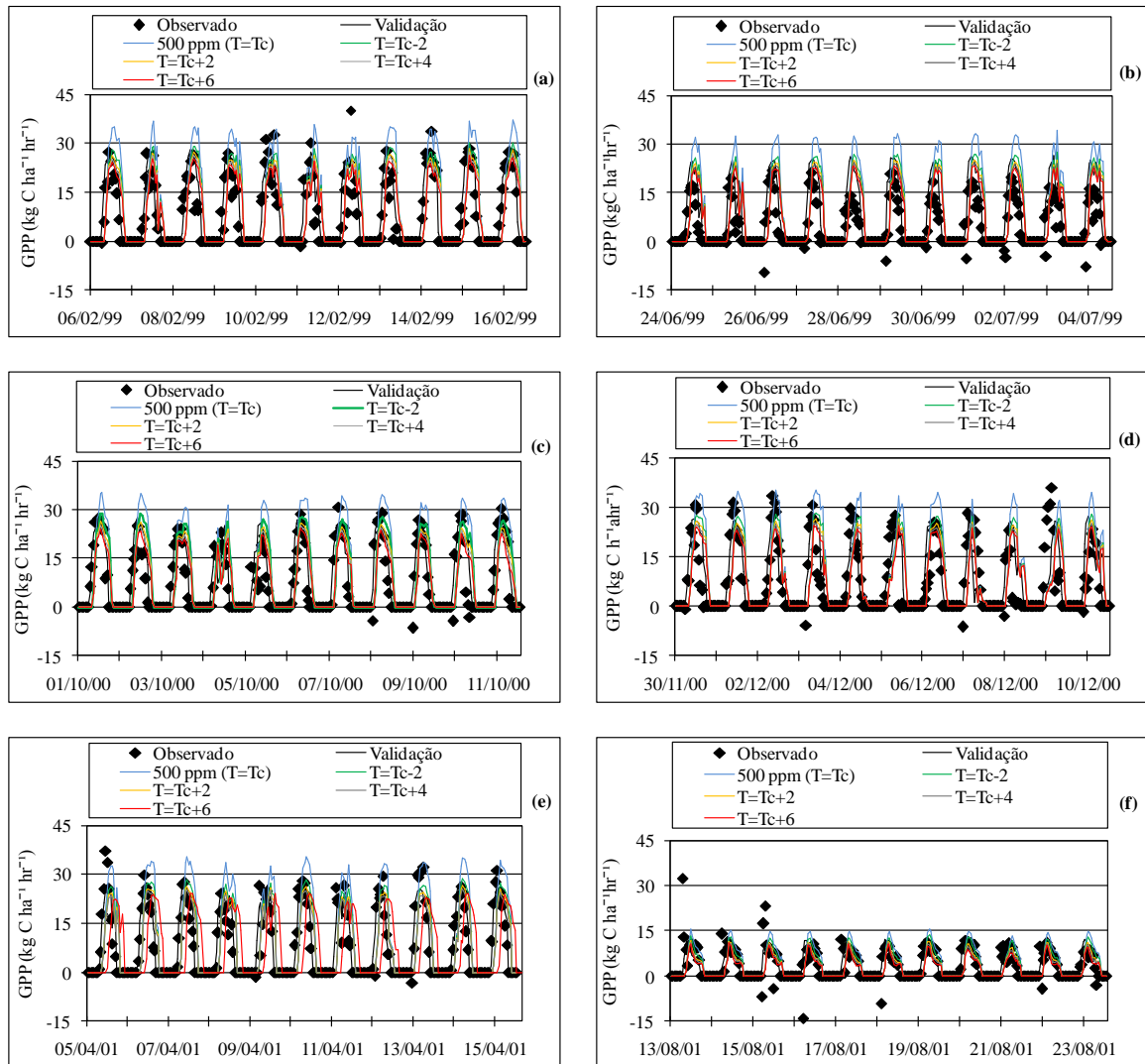


Figura C1. Gráfico com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e aumento de temperatura do ar para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

Apêndice D. Cenários de variações da concentração de CO₂ atmosférico, da temperatura do ar, da precipitação e umidade relativa

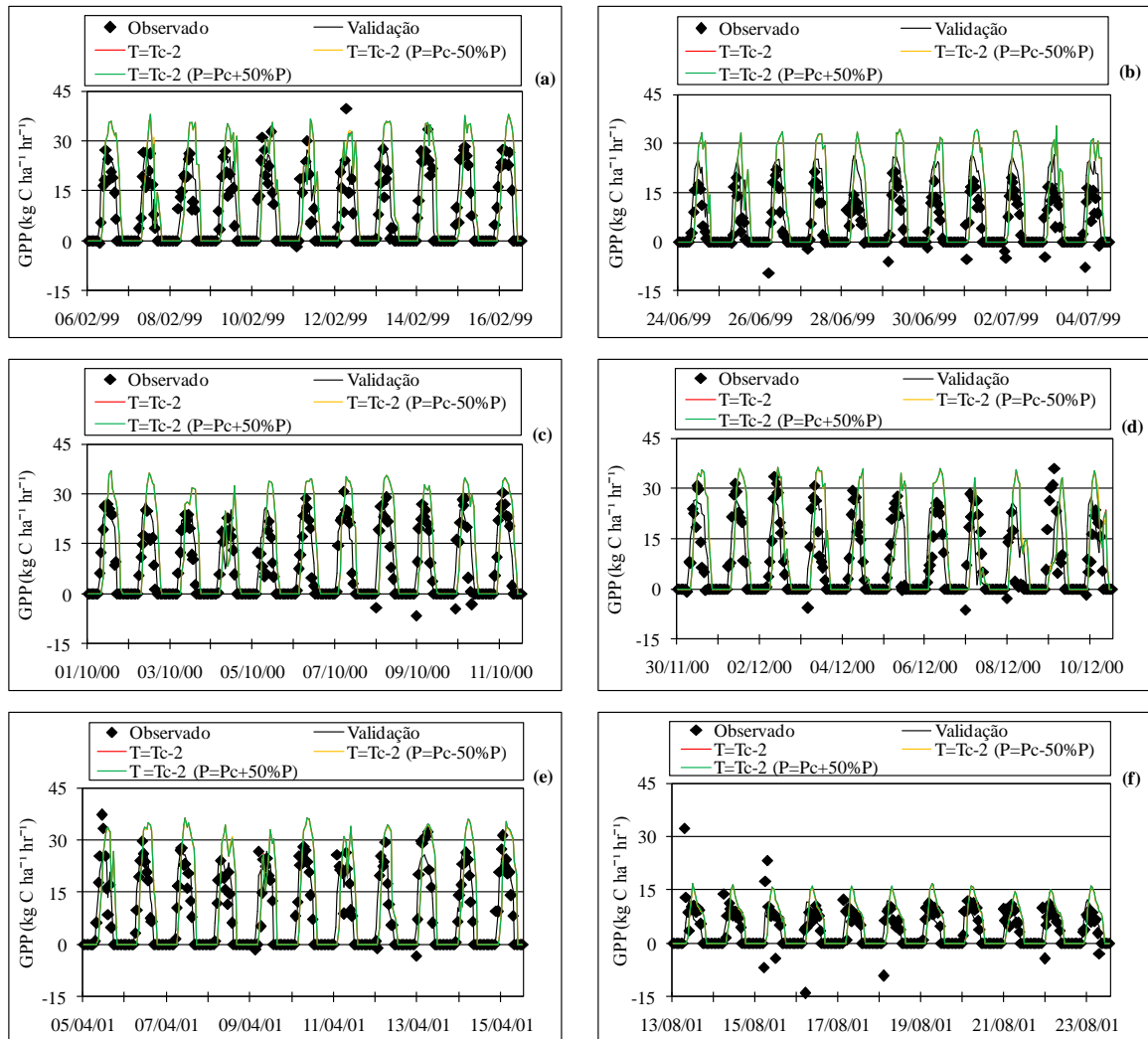


Figura D1.28 Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando uma redução na temperatura do ar controle em 2°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

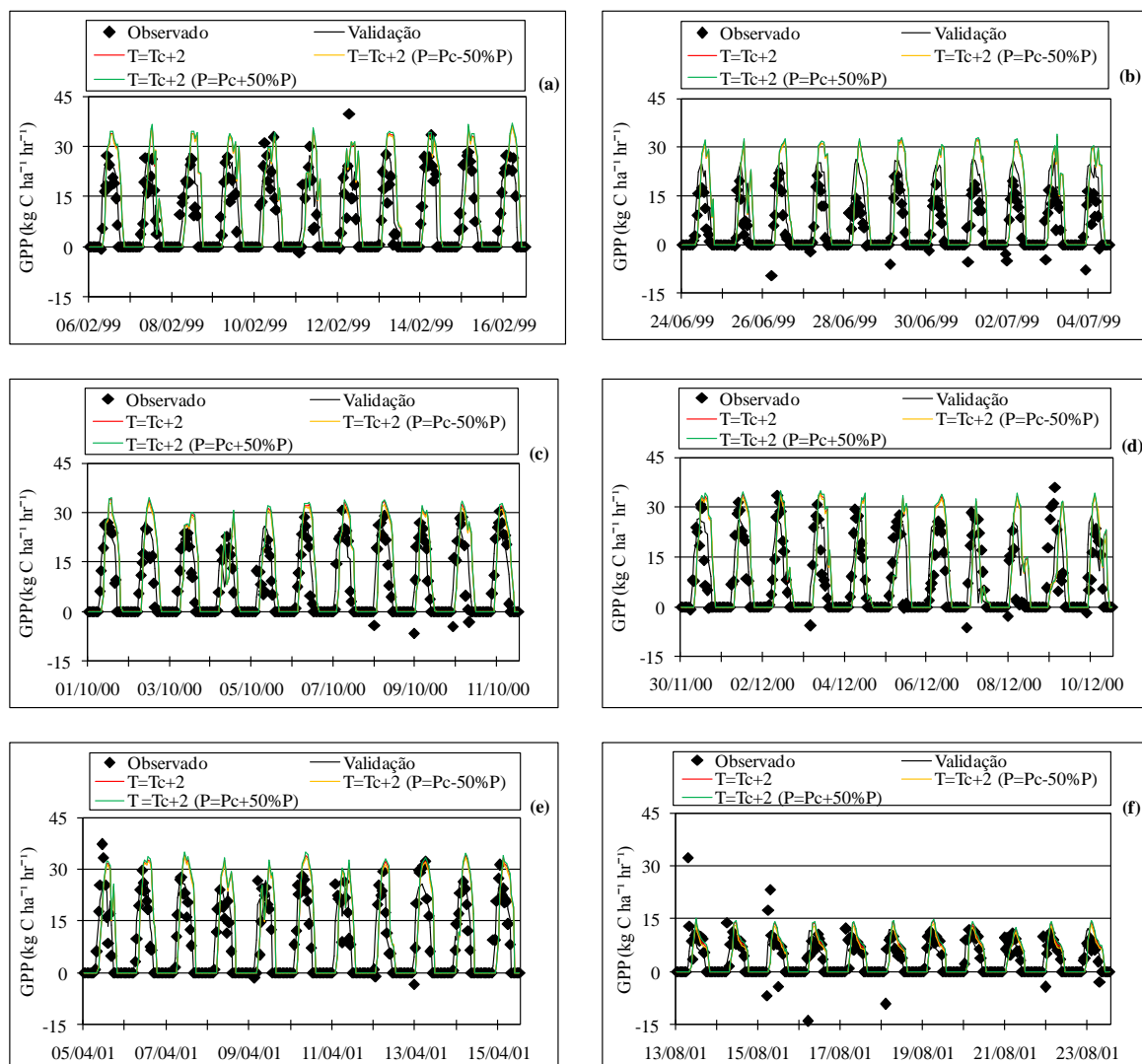


Figura D2. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO_2 atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento da temperatura do ar controle em 2°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

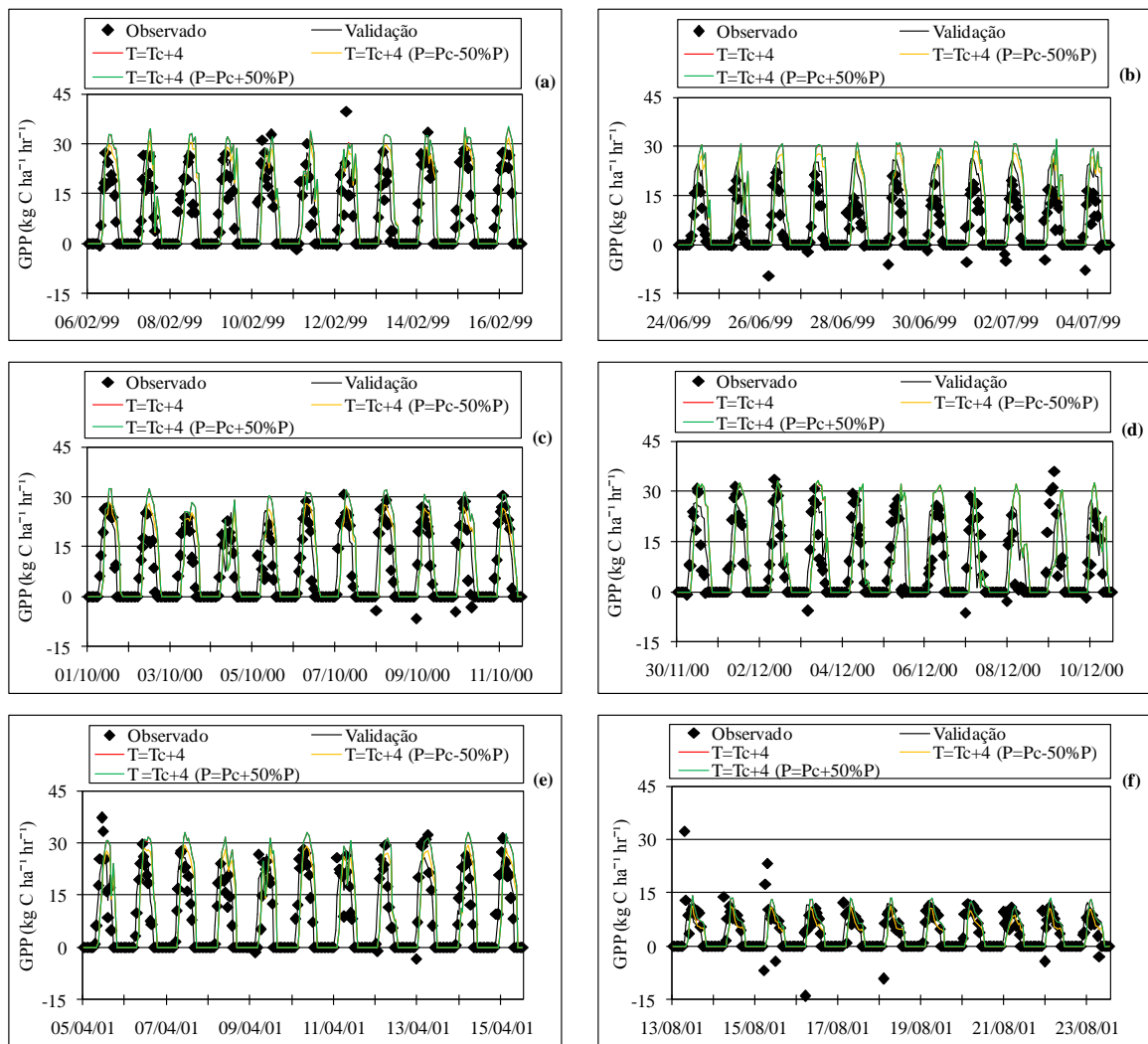


Figura D3. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO_2 atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 4°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

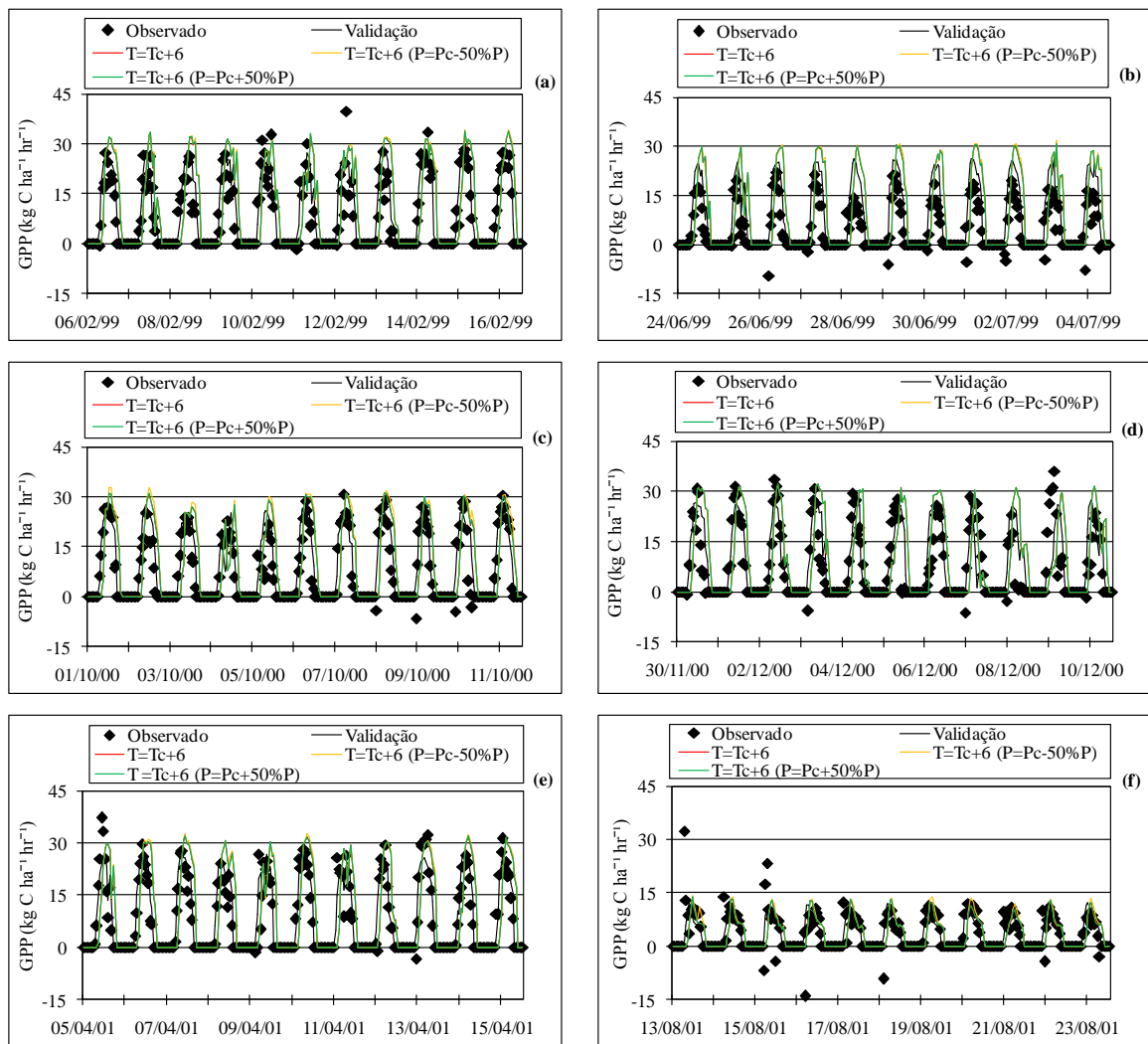


Figura D4. Gráficos com os cenários de aumento da concentração de CO₂ atmosférico e variações da precipitação considerando um aumento na temperatura do ar controle em 6°C para produtividade primária bruta (GPP) simulado pelo InLand para períodos de dez dias selecionados nos meses de fevereiro e junho de 1999, outubro, novembro e dezembro de 2000 e abril e agosto de 2001 para pastagem (*Brachiaria brizantha*) em Rondônia.

Apêndice E.

Tabela E1. Parâmetros estatísticos

	N	\bar{O}	\bar{S}	S_0	S_s
RN	7645	123,86	126,14	209,28	216,34
H	8221	38,14	31,81	66,91	62,78
LE	7170	60,78	94,05	92,64	124,89
NEE	8727	-2,37	-3,10	10,82	6,80
GPP	8727	6,45	7,67	9,40	9,76
	Rn	H	LE	NEE	GPP
Coef. Intersecção linear (β)	-1,44	0,99	22,33	-2,15	1,80
Coef. Inclinação linear (α)	1,03	0,81	1,18	0,40	0,91
Coef. Correlação (ρ)	0,99	0,86	0,88	0,64	0,88
Coef. Determinação r^2	0,99	0,74	0,77	0,41	0,77
Erro Aditivo (MSEa)	1,69	0,99	498,63	4,63	3,24
Erro Proporcional (MSEp)	53,21	218,62	397,73	44,01	1,05
Erro de Interdependência (MSEi)	19,66	-14,45	488,60	-6,12	-2,09
Erro não Sistemático (MSEu)	45,24	1014,61	3633,37	27,52	22,02
Erro sistemático (MSEs)	199,65	205,06	1384,96	42,52	2,20

em N é o número de dados observados existente para 2001 em cada variável analisada num total de 8760 dados horários por ano; \bar{O} é a média das observações; \bar{S} é a média das simulações; S_0 é o desvio padrao das Observações e S_s é o desvio padrao das simulações. Rn é o saldo de radiação, H é o fluxo de calor sensível, LE é o fluxo de calor latente, NEE é a troca líquida do ecossistema e GPP é a produtividade primaria bruta.

Apêndice F – Comportamento da precipitação atmosférica anual e da temperatura do ar nas simulações com InLand

Tabela F1. Validação

Ano	Precipitação Observada (mm ano ⁻¹)	Precipitação Simulada (mm ano ⁻¹)
1999	1669,715	1669,720
2000	1777,800	1777,805
2001	1784,072	1784,078

Tabela F2. Precipitação anual (mm ano⁻¹)

	1999	2000	2001
Precipitação controle (Pc)	1669,720	1777,805	1784,078
P = Pc + 50%	2274,52	2350,66	2461,57
P = Pc - 50%	1065,21	1211,4	1106,6

Tabela F3. Temperatura média anual (°C)

	1999	2000	2001
Temperatura controle (Tc)	24, 72	24, 39	25, 01
T = Tc - 2	22, 72	22, 39	23, 01
T = Tc + 2	26, 72	26, 39	27, 01
T = Tc + 4	28, 72	28, 39	29, 01
T = Tc + 6	30, 72	30, 39	31, 01